

Samuli Koivisto

AUTOMAATTINEN TUTKAN KEILAUSTYYPIN TUNNISTUS

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Samuli Koivisto: Automaattinen tutkan keilaustyypin tunnistus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikka, DI
Toukokuu 2019

Tässä työssä tutkitaan passiivisella vastaanottimella kerättyjen tutkasignaalien perusteella tehtävää tutkan automaattista keilaustyypin tunnistusta. Tutkittavat keilaustyypit on rajattu kierto-, sektori- ja rasterikeilaukseen. Aineiston luomiseksi on tehty tutkan keilaustyyppisimulaattori, jolla on mallinnettu amplitudiverhokäyriä eri keilausparametreilla, kohinan määrällä, yhteensulautuneilla keilauksilla, desimoiden niitä erikokoisilla ikkunoilla ja puuttuvilla ja ylimääräisillä keilauksilla.

Tunnistusmenetelminä on tutkittu kirjallisuudessa esitettyjä kahta menetelmää, sekä uuteen keilausten peräkkäisten aikaerojen suhteiden mediaaniin perustuvia päätöspuuta ja logistista regressiota. Uusi piirre on luotu parantamaan luokittelun tarkkuutta erityisesti puuttuvien keilausten tapauksessa, jossa se toimi hyvin, kun ehjiä jaksoja oli riittävästi käytettävissä.

Yhtä yksittäistä parasta luokitteluratkaisua ei löytynyt, vaan kukin neljästä tutkitusta menetelmästä toimi parhaiten jollain tutkitulla testitapauksella. Suurimmat erot eri menetelmien välille saatiin puuttuvien ja ylimääräisten keilausten tapauksessa.

Avainsanat: tutka, passiivisensori, koneoppiminen, keilaustyyppi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Samuli Koivisto: Automatic Radar Antenna Scan Type Recognition
Master's thesis
Tampere University
Degree Programme
May 2019

In this work it is studied automatic radar antenna scan type recognition from data which is received from a passive sensor. The studied scan types have been defined to be a circular, sector and raster scan. The data has been created with an antenna scan type simulator on which the envelopes are simulated with different scan parameters, noise amounts, combined beams, decimating with different size windows and missing and surplus beams.

For scan type recognition it is studied two methods from literature and new decision tree and logistic regression classifiers which used a new feature of the median of the ratios of consecutive beam intervals. The new feature is implemented for making the classification accuracy better in situations where beams are missing in the envelope or there are surplus beams in the envelope. In this situation, the new feature works well when there are enough entire periods available.

It is not found any single best classification method for different situations, but every one of four choices was the best on certain test case. The biggest differences between different methods resulted on missing and surplus beams.

Keywords: radar, passive sensor, machine learning, scan type

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Patria Aviation Oy:n laajempaa tuotekehitysprojektia alkuvuodesta 2019.

Diplomityön tekeminen on monivaiheinen tehtävä, eikä tämä työ ole ollut siitä poikkeus. Työn monissa eri vaiheissa ovat monet auttaneet sen tekemisessä. Heille kaikille kuuluu ja näkyy kiitos. Haluan siis kiittää diplomityön tarkastajia ja ohjaajia Juha Jylhää, Jukka-Pekka Kauppia ja Matti Raitoharjua asiantuntevasta ja innostavasta avusta diplomityön tekemisessä. Kiitokset myös esimiehilleni hyvien työskentelyolosuhteiden luomisesta ja myös muille signaalinkäsittelijäkollegoille hyödyllisistä kommentteista.

Perheelleni haluan esittää myös kiitoksen opiskelemiseen kannustamisesta. Ystäviäni haluan kiittää hyvästä seurasta vapaa-ajalla, niin elämä ei ole ollut opiskelujen aikana pelkkää työntekoa. Erityiskiitos myös vaimolleni motivaatiosta ja tuesta. Viimeisenä kiitos myös Jeesukselle, joka on elämällään, kuolemallaan ja ylösnousemuksellaan vaikuttanut länsimaiseen kulttuuriin, tieteeseen ja teknologiaan, sekä omaan elämääni niin merkittävästi, että se on mahdollistanut tämän opinnäytetyön tekemisen.

Tampereella, 12. toukokuuta 2019

Samuli Koivisto

SISÄLLYSLUETTELO

Kuvaluettelo	vi
Taulukkoluetelo	viii
Lyhenteet ja merkinnät	ix
1 Johdanto	1
2 Tausta	5
2.1 Tutkien keilaustyyppit ja keilaustyyppien parametrit	5
2.1.1 Kiertokeilaus (engl. <i>circular scan</i>)	5
2.1.2 Sektorikeilaus (engl. <i>sector scan</i>)	6
2.1.3 Rasterikeilaus (engl. <i>raster scan</i>)	8
2.1.4 Elektroninen keilaus (engl. <i>electronic scan</i>)	8
2.1.5 Ruuvikeilaus (engl. <i>helical scan</i>)	9
2.1.6 Spiraalikeilaus (engl. <i>spiral scan</i>)	11
2.1.7 Kartiokeilaus (engl. <i>conical scan</i>)	11
2.2 Virhelähteet	12
2.3 Nykyiset keilaustyyppin tunnistusmenetelmät	12
2.3.1 Eravci et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä	15
2.3.2 Kim et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä	21
2.3.3 Ayazgok et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä	22
2.3.4 Li et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä	24
3 Tutkimusmenetelmät ja aineisto	25
3.1 Tutkan keilaustyyppisimulaattori	25
3.2 Käytetty simulaatiojärjestely	28
3.3 Tutkitut keilaustyyppien tunnistuksen menetelmät	29
3.3.1 Eravci et al. menetelmä	30
3.3.2 Kim et al. menetelmä ja Ayazgok et al. tutkimuksen pääkeilanirrostusmenetelmä	30
3.3.3 Mediaanipäättöspuu	32
3.3.4 Logistinen regressio	33
3.4 Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointi	33
3.5 Yhteensulautuneet keilaukset	35
4 Tulokset ja niiden tarkastelu	36
4.1 Ideaaliset keilaukset	36
4.2 Kohina	38
4.3 Herkkyystason ja ristikorrelaation kynnyksen vaihtelun vaikutus luokitteluun	39
4.4 Yhteensulautuneet keilaukset	40
4.5 Näytteiden määrä jakson aikana	41

4.6	Puuttuvat ja ylimääräiset keilaukset	41
4.7	Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointi	45
5	Yhteenveto	48
	Lähdeluettelo	52

KUVALUETTELO

1.1	Ideaalinen esimerkki ESM-vastaanottimessa havaitusta amplitudiverhokäyrästä, jossa harmaalla värillä kuvataan pulsseja ja mustalla värillä pulssien pohjalta luotua amplitudiverhokäyrää	3
2.1	Kiertokeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan vaakasuunnassa täysi kierros. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla ja keskellä on tutkan säteilykuvio, johon on merkitty pää- ja sivukeilojen sijainti. Alhaalla: Esimerkki, miten kiertokeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.	6
2.2	Sektorikeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan vaakasuunnassa tiettyä sektoria edes takaisin. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten sektorikeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.	7
2.3	Rasterikeilaus: Ylhäällä: Sektorikeilauksesta poiketen myös korkeuskulmaa muutetaan keilauksen aikana. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten rasterikeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä. Keilanleveydet ovat kapeampia, jotta verhokäyrälle mahtuu paremmin useampi jakso.	7
2.4	Elektroninen keilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan elektronisesti hahuttujen kohteiden välillä (kuvassa merkitty tähtinä). Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten elektronisesti keilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.	9
2.5	Ruuvikeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan vaakasuunnassa täysi kierros, ja samalla korkeuskulmaa muutetaan. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten ruuvikeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.	10
2.6	Spiraalikeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan spiraalin muotoista rataa pitkin. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten spiraalikeilaavan tutkan signaali näkyy amplitudiverhokäyrällä.	10
2.7	Kartiokeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan kohteen ympärillä. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten kartiokeilaavan tutkan signaali näkyy amplitudiverhokäyrällä.	11
2.8	Eravci et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä. Simulaattorista saatu amplitudiverhokäyrä esikäsittellään, jonka jälkeen siitä irrotetaan luokittelussa käytettävät piirteet. Piirteiden perusteella amplitudiverhokäyrä luokitellaan ja luokittelutuloksena saadaan tutkan keilaustyyppi.	16
2.9	Eravci et al. tutkimuksen päätöspuu	20

2.10 Kim et al. tutkimuksen päätöspuu. Katkoviivalla rajattu alue on keilausten välisten aikaerojen erojen varianssiin perustuva piirre, jonka tavoitteena on luokitella virheelliset rasterikeilaustunnistukset tunnistamattomiksi.	22
3.1 Antennielementtien lukumäärä vaakasuuntaisen keilanleveyden funktiona .	26
3.2 Muokattu Eravci et al. päätöspuu	31
3.3 Muokattu Kim et al. päätöspuu	31
3.4 Mediaanipäätöspuu	32
3.5 Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointi. Kuvassa 100 näytteen mitattaiselta ikkunalta valitaan ensimmäinen, viimeinen, minimi ja maksimi-arvo, joiden perusteella loput arvot interpoloidaan desimoituun amplitudiverhokäyrään.	34
4.1 Sekaannusmatriisit ideaalitapauksissa, kun kutakin keilaustyyppiä on simuloitu 1000 amplitudiverhokäyrää	37
4.2 Kohinan vaikutus luokittelutarkkuuteen eri keilaustyypeillä ja luokittelumenetelmillä.	38
4.3 Vasemmalla: Paras muiden pääkeilojen etsinnän ristikorrelaation kynnyksi eri herkkyystasoilla. Oikealla: Herkkyystason muutoksen vaikutus luokittelutarkkuuteen, kun kullakin herkkyystasolla on ristikorrelaation kynnnykseksi valittu vasemmassa kuvaajassa näkyvä arvo.	39
4.4 Yhteensulautuneet keilaukset esimerkki	40
4.5 Sektorikeilauksessa yhteensulautuneiden keilausten vaikutus luokittelutarkkuuteen. Vasemmalla: Ayazgok et al. pääkeilanirrotusmenetelmä. Oikealla: Eravci et al. tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmä	41
4.6 Jakson ajalle uudelleennäytteistettyjen näytteiden määrän vaikutus luokittelutarkkuuteen Eravci et al. menetelmässä	42
4.7 Esimerkki puuttuvasta keilauksesta. Amplitudiverhokäyrältä puuttuu vasemmalta laskien neljäs keilaus.	43
4.8 Vasemmalla: Ensimmäisen kolmen jakson ajalle lisätyn ylimääräisen keilauksen vaikutus luokittelutarkkuuteen eri jaksojen määrillä. Oikealla: Ensimmäisten kolmen jakson ajalta poistetun keilauksen vaikutus luokittelutarkkuuteen eri jaksojen määrillä.	43
4.9 Aikaerojen varianssin ja aikaerojen erojen varianssin sirontakaavio	44
4.10 Vasen sarake: Piirteet ilman puuttuvia keilauksia. Oikea sarake: piirteiden arvot neljän jakson ajalta, kun ensimmäisten kolmen jakson ajalta on poistettu yksi keilaus. Yläriivi: Eravci et al. tutkimuksen piirteet aikaerojen suhde ja amplitudivaihtelu. Alariivi: Kim et al. tutkimuksen piirteet aikaerojen varianssi ja amplitudivarianssi.	45
4.11 Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimoinnin vaikutus luokittelutarkkuuteen eri menetelmillä ja eri keilaustyypeillä	46

TAULUKKOLUETTELO

2.1	Tutkimuksissa tunnistetut keilaustyytit	13
2.2	Tutkimuksissa esiteltyjen menetelmien avaintiedot ja tässä diplomityössä toteutetut ratkaisut näistä menetelmistä	14
2.3	Antennin keilaustyyppisimulaattorissa käytettyjen keilausparametrien vaihteluvälit Eravci et al. tutkimuksessa [4]	17
3.1	Keilaustyyppien simulaatioparametrit	29
4.1	Jaksonajan tunnistumisen onnistuminen ideaalitapauksessa	37

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CART-algoritmi	Päätöspuiden opetukseen käytetty algoritmi. (engl. <i>Classification and Regression Tree</i>)
dBW	Desibeliä suhteessa yhteen wattiin, tehon yksikkö
dB	Desibeli, logaritminen tehosuhteiden vertailuun käytetty yksikkö
EA	Elektorninen vaikuttaminen (engl. <i>Electornic Attack</i>)
ELINT	Elektroninen mittaustiedustelu (engl. <i>Electronic Intelligence</i>)
ELSO	Elektroninen sodankäynti
EP	Elektroninen suojautuminen (engl. <i>Electronic Protection</i>)
ES	Elektroninen tuki (engl. <i>Electronic Support</i>)
ESM	Elektroniset tukitoimet (engl. <i>Electronic Support Measures</i>). Vanhempi nimitys Elektroniselle tuelle, jota käytetään nykyään käsiteltäessä elektronisen tuen järjestelmiä
EW	Elektroninen sodankäynti (engl. <i>Elektronic Warfare</i>)
FFT	Nopea Fourier'n muunnos (engl. <i>Fast Fourier Transform</i>). Joukko algoritmeja, jotka mahdollistavat diskreetin Fourier'n muunnoksen laskemisen määritelmää tehokkaammin
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö
SNR	Signaalikohinasuhde (engl. <i>Signal to Noise Ratio</i>)
TAU	Tampereen yliopisto (engl. <i>Tampere University</i>)
TUNI	Tampereen korkeakoulu yhteisö (engl. <i>Tampere Universities</i>)
V	Voltti, jännitteen yksikkö

1 JOHDANTO

Elektroniseksi sodankäynniksi (ELSO, engl. EW = *Electronic Warfare*) kutsutaan oman sodankäynnin edistämiseen ja vihollisen sodankäynnin heikentämiseen tähtääviä sähkömagneettista spektriä hyödyntäviä menetelmiä. Se jaetaan kolmeen kategoriaan, jotka ovat elektroninen tuki (ES = *Electronic Support*), elektroninen vaikuttaminen (EA = *Electronic Attack*) ja elektroninen suojautuminen (EP = *Electronic Protection*). [11, s. 19-20]

Elektronisen tuen tavoitteena on tuottaa tietoa niin vihollisen kuin omien käyttämistä sähkömagneettista säteilyä hyödyntävistä järjestelmistä. Elektronisella vaikuttamisella taas pyritään heikentämään vihollisen sähkömagneettista spektriä hyödyntävien järjestelmien käyttöä, ja elektronisella suojautumisella tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla pyritään varmistamaan omien sähkömagneettista säteilyä hyödyntävien järjestelmien toiminta ja vaikeuttamaan vihollisen tiedustelutoimintaa. Elektronisessa sodankäynnissä hyödynnetään elektronisella mittaustiedustelulla (ELINT = *Electronic Intelligence*) kerättyä tietoa vihollisen muihin kuin viestintään käyttämistä sähkömagneettista spektriä hyödyntävistä järjestelmistä. [11, s. 21,23-24]

Keskeinen osa elektronista sodankäyntiä ovat tutkat, sillä niiden toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Koska tutkilla halutaan saada tietoa kaukaisista kohteista, lähetetään tutkan säteilyä ensin haluttuun suuntaan tietyn kokoiselle alueelle, minkä jälkeen vastaanotetaan kyseisessä suunnassa olleista kohteista heijastunutta ja sironnutta säteilyä. Vastaanotetun säteilyn perusteella pyritään löytämään kohde ja määrittämään, missä suunnassa se on, kuinka kaukana se on sekä mikä on kohteen liikkeen nopeus ja suunta. [11, s. 173]

Haluttuun suuntaan kohdistettavaa säteilyenergiaa kutsutaan tutkan pääkeilaksi. Kuitenkaan kaikkea säteilyenergiaa ei saada kohdistettua pääkeilaan, joten tutka säteilee myös muihin suuntiin. Tätä muihin suuntiin suuntautuvaa säteilyä kutsutaan tutkan sivukeiloiksi [25, s. 91-92]. Sivukeilat heikentävät tutkan kohteen havaitsemistarkkuutta erityisesti tutkaa häiritäessä, joten sivukeilojen tasoa suhteessa pääkeilaan pyritään minimoimaan [14, s. 549].

Säteilyenergiaa ei myöskään kannata yleensä lähettää tutkalla jatkuvasti, sillä samalla antennilla on hyvin vaikea kuunnella heikkoja kaikuja samaan aikaan, kun lähettää voimakkaita radioaaltoja. Vastaanotettujen kaikujen voimakkuus vaihtelee paljon, mutta lähetetyn signaalin tehon ja vastaanotetun kaiun tehon suhde voi olla jopa $1 : 10^{-19}$ [24,

s. 1.2]. Tutkat ovatkin yleensä pulssitutkia [24, s. 1.5], jotka lähettävät säteilyn lyhyinä pulsseina ja vastaanottavat kaikki pulssien välillä.

Tutkan pääkeilan leveys määrää, kuinka tarkasti tutkalla saa suunnittua kohteita. Keilan leveys määritellään yleensä keilan amplitudikäyrältä tutkasta katsottuna niiden pisteiden välisenä kulmana, joiden välillä säteilyenergian voimakkuus vähenee puoleen maksimista. Vähentyminen puoleen on noin 3 dB ($\log_{10}(3) \approx 0,4771$) eli keilanleveydellä tarkoitetaan kulmaa niin sanottujen 3 dB:n pisteiden välillä, jossa signaalin amplitudi on vähentynyt 3 dB maksimistaan [11, s. 454]. Jos tutkan keilan leveys on esimerkiksi 5° , ja tutka vastaanottaa kaiun, saadaan tällä tietoon, että kohde on 5° kokoisella sektorilla siinä suunnassa, jonne tutkan keila osoitti.

Koska tutkan pääkeila kattaa kerrallaan vain pienen osan kiinnostuksen kohteena olevasta alueesta, joudutaan tutkan keilaa liikuttamaan. Tutkan antennia voidaan liikuttaa mekaanisesti, elektronisesti tai hybriditutkissa molemmilla tavoilla. Mekaanisessa ohjauksessa tutkan antennia liikutetaan mekaanisesti ylös ja alas tai oikealle ja vasemmalle. Myös molempiin suuntiin liikuttaminen on mahdollista. Tätä tekniikkaa käytetään yleensä hävittäjissä tai ilmatorjunnan seurantatutkissa. Mekaanisen keilauksen rajoituksena on antennin hitausmomentti [11, s. 174-175]. Elektronisessa ohjauksessa tutkan keilaa ohjataan vaihtamalla yksittäisille antennielementeille syötetyn signaalin vaihetta [8, s. 191]. Erilaisia tutkan keilan liikuttamistapoja kutsutaan tutkan keilaustyypeiksi [26, s. 235].

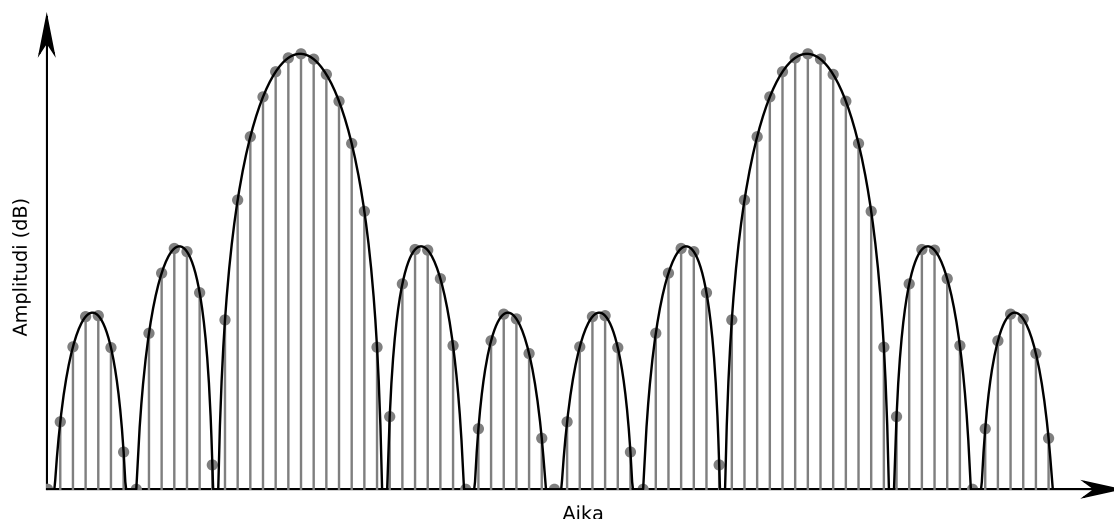
Elektronisessa sodankäynnissä vastapuolen kiinnostuksen kohteena on siepata tutkan lähettämää signaalia tarkoitukseen suunnitelluilla passiivisilla ESM (*Electronic Support Measures*)-vastaanottimilla. ESM eli elektroniset tukitoimet on vanhempi nimitys elektroniselle tuelle, ja termiä käytetään nykyään enää käsiteltäessä elektronisen tuen järjestelmiä [11, s. 259-260]. ESM-vastaanottimia käytetään näin ollen tietojen keräämiseen vihollisen sähkömagneettista spektriä hyödyntävistä järjestelmistä. Tämän diplomityön aiheena on tutkan keilaustyyppien tunnistus ESM-vastaanottimella siepatusta signaalista. Tämä toimenpide kuuluu elektronisen sodankäynnin luokittelussa elektronisen tukeen, sillä tutkan keilaustyyppistä voidaan päätellä tutkan toimintatarkoitus [2, s. 148] [1, s. 283].

Tässä työssä keskitytään keilaustyypeistä kierto-, sektori- ja rasterikeilaustyyppien tunnistukseen amplitudiverhokäyrän perusteella, joka saadaan tuotettua simuloimalla ESM-vastaanottimen vastaanottamaa dataa tutkan keilaustyyppisimulaattorilla. Tutkittavien keilaustyyppien määrä on rajattu näihin kolmeen työn laajuuden rajaamiseksi. Nämä keilaustyyppit esitellään kirjallisuudessa tyyppillisesti myös keilaustyypeistä ensimmäiseksi ja niiden tunnistukseen käytettävistä piirteistä saa hyvän käsityksen menetelmien toimivuudesta.

Kuvassa 1.1 on teoreettinen esimerkki ESM-vastaanottimen vastaanottaman datan perusteella tuotetusta amplitudiverhokäyrästä. Kuvassa harmaalla näkyvät pallot kuvaavat vastaanotettuja pulsseja, ja mustalla on näiden pohjalta piirretty amplitudiverhokäyrä. Korkeimmat huiput kuvaavat pääkeiloja ja matalammat sivukeiloja.

Todellisuudessa vastaanotetussa signaalissa on kuitenkin monia epäideaalisuuksia tä-

hän esimerkkiin nähden. Esimerkiksi pulssintoistoväli ei useinkaan ole vakio, sillä tutkissa vaihdellaan sitä [26, s. 282], minkä seurauksena amplitudiverhokäyrän näytteistys on epätasavälinen. Pulssintoistovälin käänteisluku on pulssintoistotaajuus, joka vaihtelee kaukovalvontatutkien noin 300 Hz:stä hävittäjätutkien jopa noin 300 000 Hz:iin [11, s. 175]. Kaikkia pulsseja ei myöskään aina saada vastaanotettua ja amplitudiverhokäyrällä voidaan myös havaita ylimääräisiä pulsseja. Näiden epäideaalisuuksien lisäksi amplitudiverhokäyrällä on aina myös kohinaa.



Kuva 1.1. *Ideaalinen esimerkki ESM-vastaanottimessa havaitusta amplitudiverhokäyrästä, jossa harmaalla värillä kuvataan pulsseja ja mustalla värillä pulssien pohjalta luotua amplitudiverhokäyrää*

Passiivisilla vastaanottimilla kerätty tutkasignaalien käsittely ja keilaustyyppin tunnistus on aiemmin tehty käsin tulkitsemalla erilaisia vastaanotetusta tutkasignaalista määrittelyjä parametreja [4] [26, s. 252]. Tämän toimintatavan ongelmana on, että tutkasignaaleja tulkitsevan operaattorin kokemuksen ja ammattitaidon kerryttäminen on kallista, ja manuaalisessa käsittelyssä on automaattiseen tunnistukseen nähden huomattava viive. Lisäksi sähkömagneettista spektriä hyödyntävien järjestelmien kehittyminen tekee tulkittavasta ympäristöstä entistä monimutkaisemman. Näin ollen tulevaisuuden ESM-vastaanottimissa on suuri tarve elektronisen tuen suorituskykyä parantavalle tutkan keilaustyyppin automaattiselle tunnistamiselle.

Automaattisesta tutkan keilaustyyppin tunnistuksesta löytyy niukasti julkaistuja tutkimuksia. Aihetta on tutkittu julkaisuissa [3, 4, 10, 13], ja lisäksi keilaustyyppin tunnistukseen on patentoitu yksi menetelmä [9]. Eravci et al. [4] ja Kim et al. [10] todetaan, että kyseinen patentoitu menetelmä ei ole erityisen hyvä keilaustyyppien tunnistukseen, joten sitä ei ole tässä työssä tutkittu.

Työssä toteutettiin kirjallisuuskatsaus (luku 2), jossa esitellään kirjallisuudesta löytyneet keilaustyyppit, keilaustyyppin tunnistusta häiritsevät virhelähteet ja neljän edellä mainitun tutkimuksen menetelmät. Tutkimusten menetelmät on käsitelty painottaen niitä osia, jotka ovat olennaisia tässä työssä tutkittavien kierto-, sektori- ja rasterikeilausten tunnistuk-

sessä. Tutkimuksista Eravci et al. [4] ja Kim et al. [10] keskittyvät mekaanisten keilaustyyppien tunnistamiseen, joten käsittely keskittyy suurimmaksi osaksi näihin tutkimuksiin.

Luvussa 3 esitellään työssä käytetyt menetelmät. Amplitudiverhokäyrien luomiseen on toteutettu keilaustyyppisimulaattori, jolla on mahdollista simuloida tutkittavia kolmea keilaustyyppiä. Simulaattorissa on mahdollista vaihdella eri keilaustyyppien parametreja. Lisäksi simulaattorilla voi mallintaa kohinaa sekä puuttuvia ja ylimääräisiä keilauksia. Keilaustyyppisimulaattorilla luotuja amplitudiverhokäyriä on tämän jälkeen tutkittu eri menetelmillä.

Työssä toteutettiin ja tutkittiin neljää eri menetelmää. Näistä kaksi ovat Eravci et al. [4] ja Kim et al. [10] tutkimuksen menetelmät. Tutkimuksissa esitellyistä menetelmistä todetaan, etteivät ne ole virhesietoisia puuttuville tai ylimääräisille keilauksille. Näin ollen häiriösitouisuuden parantamiseksi erityisesti puuttuville keilauksille on luotu uusi piirre. Kirjallisuudessa esitellyjä menetelmiä on tämän jälkeen jatkokehitetty tämän piirteen avulla. Loput kaksi menetelmää hyödyntävät uutta piirrettä, ja niiden välisenä erona on vain käytetty luokitteluratkaisu.

Tämän tutkimuksen tulokset on esitelty luvussa 4 seitsemälle erilaiselle testitapaukselle. Ensimmäisenä on esitetty eri menetelmien tulokset ideaalisilla amplitudiverhokäyrillä, kun keilausparametreja on vaihdeltu. Näin saadaan tietoon, missä keilaustyyppien parametrirajoissa menetelmät toimivat. Seuraavaksi on esitetty kohinan lisäämisen vaikutus amplitudiverhokäyriin, jotta on saatu selville menetelmien virhesietoisuus kohinalle.

Kolmantena on esitetty ESM-vastaanottimen herkkyyskynnyksen vaihtelun vaikutus tunnistustuloksiin, sillä herkkyyskynnys määrää, kuinka paljon pohjakohinaa tunnistusprosessiin pääsee. Neljäntenä on esitelty amplitudiverhokäyrällä yhteensulautuneita keilauksia, sillä sektori- ja rasterikeilauksissa keilaukset voivat amplitudiverhokäyrällä sulautua yhteen, jos ESM-vastaanotin on tutkan sektorin reuna-alueella.

Viidentenä on esitetty ylimääräisen ja puuttuvan keilauksen vaikutus tunnistustuloksiin, sillä tutkan keilauksia voi jäädä vastaanottamatta tai aiemassa tutkasignaalien käsittelyssä tapahtuneen virheen takia voi amplitudiverhokäyrällä olla ylimääräisiä keilauksia. Kuudentena on esitetty alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointia, sillä keilaustyyppien tunnistuksen kannalta kaikkea vastaanotettua tutkadataa ei tarvita. Lisäksi työssä on toistettu Eravci et al. tutkimuksen koe, jossa on selvitetty uudellennäytteistyksessä parasta näytteiden määrää jakson aikana. Yhteenvedossa luvussa 5 on esitelty tämän työn johtopäätökset.

2 TAUSTA

Tässä luvussa käsitellään teoreettista taustaa ESM-vastaanottimessa suoritettavalle automaattiselle tutkan keilaustyyppin tunnistukselle. Käsittelyn pääpaino on menetelmissä, joilla on mahdollista tunnistaa kierto-, sektori- ja rasterikeilaus. Näitä menetelmiä koskevissa tutkimuksissa on pääkeilojen ominaisuuksiin perustuvat aikatazon luokittelumenetelmät havaittu tehokkaimmiksi. Tunnistusta häiritsevät kohina, vastaanotettaessa puuttumaan jääneet keilaukset sekä ylimääräiset keilaukset. Käytännön tunnistusmenetelmän tulee olla virhesietoinen näille virhelähteille.

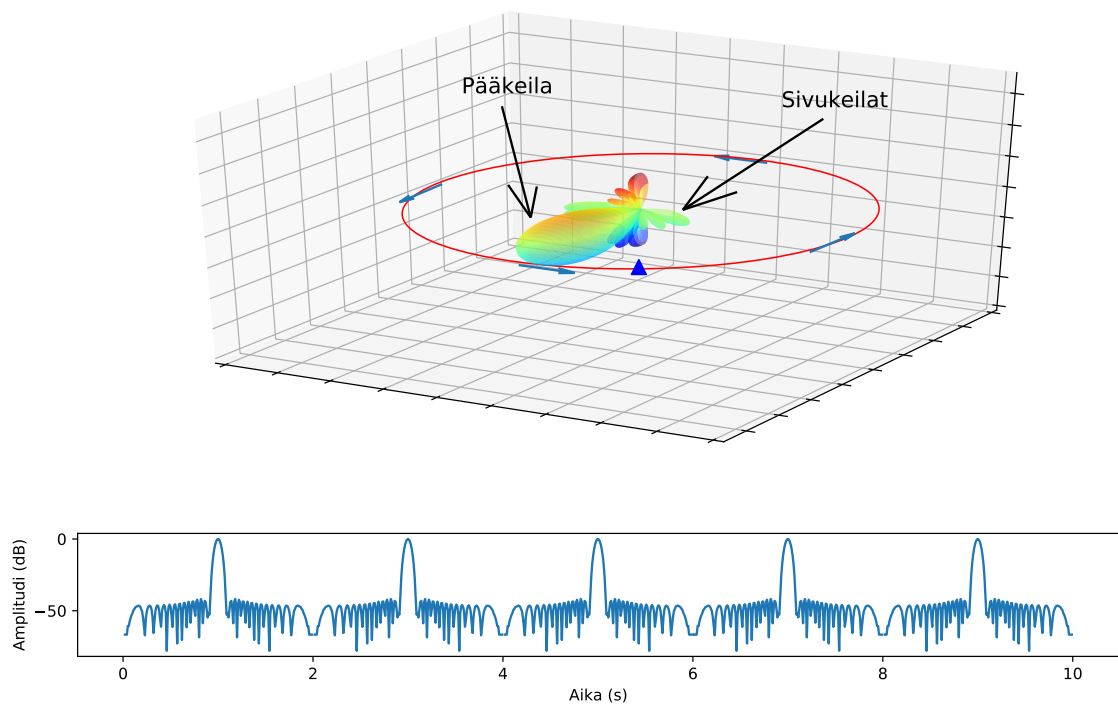
2.1 Tutkien keilaustyyppit ja keilaustyyppien parametrit

Kirjallisuudessa esitettyjä tutkan keilaustyypppejä ovat kierto-, sektori-, rasteri-, ruuvi-, spiraali- ja kartiokeilaus sekä elektroninen keilaus [26, s. 239-251] [2, s. 149-156]. Näiden lisäksi nykyään jo käytöstä poistuneiksi keilaustyypeiksi luetaan Palmer-keilaus, jolla tarkoitetaan kartiokeilauksen ja ruuvi- tai rasterikeilauksen yhdistelmää ja keilanheittoa, jossa keilaa liikutetaan hieman oikealle ja vasemmalle ja ylös ja alas halutun kohteen läheisyydessä [26, s. 248-249].

Kierto- ja sektorikeilauksessa käytetään viuhkakeilaa, jossa keila on pystysuunnassa leveämpi kuin vaakasuunnassa tai toisinpäin. Rasteri-, ruuvi-, spiraali- ja kartiokeilauksessa käytetään kynäkeilaa, jossa keilan leveys niin pysty- kuin vaakasuunnassakin on lähes sama. [26, s. 239-250]

2.1.1 Kiertokeilaus (engl. *circular scan*)

Kiertokeilauksessa tutkan keila kiertää vaakatasossa ympyrää täyden kierroksen (kuva 2.1) [2, s. 149]. Kiertokeilauksen parametrit ovat jaksonaika ja keilan leveys korkeus- ja vaakasuunnassa. ESM-vastaanottimessa havaittavalla amplitudiverhokäyrällä kiertokeilaus näkyy tasaisin väliajoin esiintyvinä keilauksina, joiden amplitudi pysyy lähes samana pääkeilasta toiseen. Kiertokeilausta käytetään erityisesti kaukaisten kohteiden etsintään [26, s. 239].

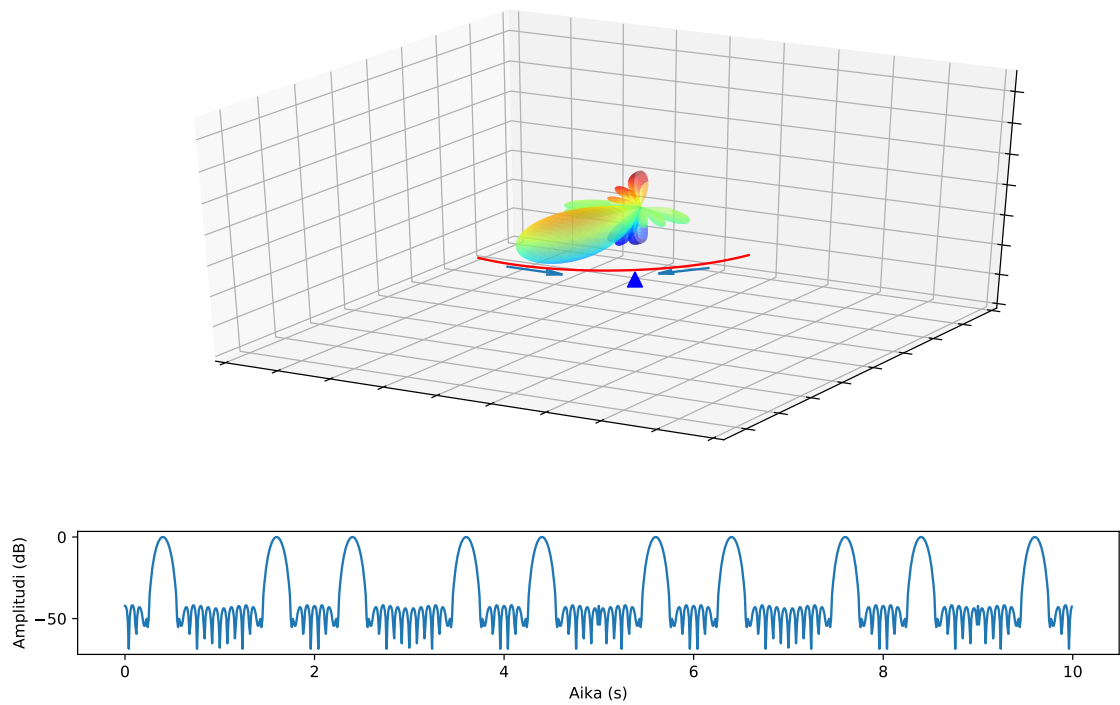


Kuva 2.1. Kiertokeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan vaakasuunnassa täysi kierros. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla ja keskellä on tutkan säteilykuvio, johon on merkitty pää- ja sivukeilojen sijainti. Alhaalla: Esimerkki, miten kiertokeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.

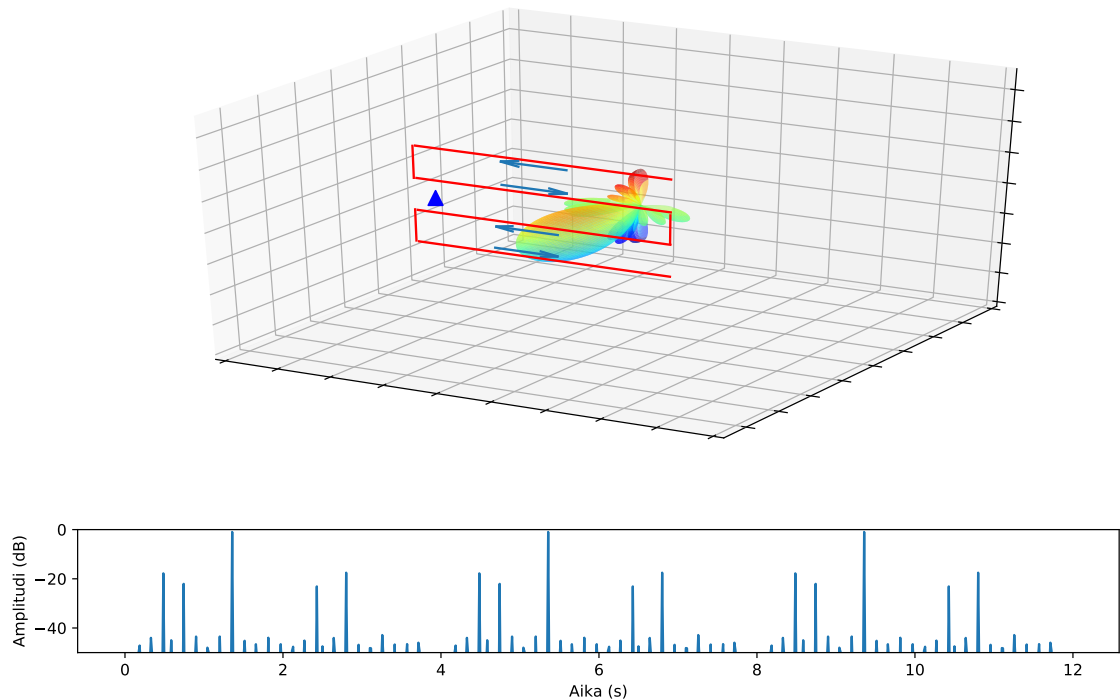
2.1.2 Sektorikeilaus (engl. *sector scan*)

Sektorikeilauksessa tutkan keilaa liikutetaan pitkin rajattua segmenttiä edestakaisin (kuva 2.2). On myös mahdollista, että sektoria keilataan vain yhteen suuntaan, jolloin sektorikeilaus näkyy amplitudiverhokäyrällä kuten kiertokeilaus, mutta jaksonaika on kiertokeilausta nopeampi. Sektorikeilausta käytetään esimerkiksi korkeuskoordinaattien estimointiin kohteesta, joka on ensin paikannettu kiertokeilaavalla tutkalla. Tällöin keilattava sektori on korkeussuunnassa. Vaakasuuntaista sektorikeilausta käytetään esimerkiksi laiva- ja lentokonetutkien etsintätoiminnoissa. [26, s. 240-243]

Sektorikeilauksen parametreina ovat jaksonaika, keilan leveys korkeus- ja vaakasuunnassa ja sektorin leveys ja suunta. Amplitudiverhokäyrällä kaksisuuntainen sektorikeilaus näkyy siten, että eri keilausten amplitudit pysyvät suunnilleen samoina, mutta peräkkäisten keilausten välinen aika on kestoaltaan vuorotellen lyhyempi ja pidempi. Poikkeuksena tästä on tilanne, jossa ESM-vastaanotin on sektorin keskellä, jolloin amplitudiverhokäyrä näyttää samalta kuin kiertokeilaavan tutkan tapauksessa.



Kuva 2.2. Sektorikeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan vaakasuunnassa tiettyä sektoria edes takaisin. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten sektorikeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.



Kuva 2.3. Rasterikeilaus: Ylhäällä: Sektorikeilauksesta poiketen myös korkeuskulmaa muutetaan keilauksen aikana. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten rasterikeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä. Keilanleveydet ovat kapeampia, jotta verhokäyrälle mahtuu paremmin useampi jakso.

2.1.3 Rasterikeilaus (engl. *raster scan*)

Rasterikeilaus eroaa sektorikeilauksesta siten, että tutkan keilaa liikutetaan myös pystysuunnassa siten, että jokainen siirtymä sektorin laidasta toiseen tehdään eri korkeuskulmassa tietyn korkeussektorin sisällä (kuva 2.3) [2, s. 151]. Kutakin siirtymää sivusuunnassa kutsutaan rasterin linjaksi. Linjojen välit korkeussuunnassa määrätään tutkan 3 dB:n keilanleveyden perusteella niin, että linjojen väliin jää vähemmän etäisyyttä, kuin mitä 3 dB:n keilanleveys on [25, s. 388].

Rasterikeilaus on yleinen keilaustyyppi hävittäjälentokoneissa, jossa sitä käytetään kohteiden etsintään [25, s. 5]. Rasterikeilauksen parametreja ovat jaksonaika, keilanleveys, keilaussektorin rajat korkeus- ja vaakasuunnassa ja linjojen määrä. Amplitudiverhokäyrällä rasterikeilaus näkyy siten, että keilausten väliset ajat ja amplitudit vaihtelevat jaksollisesti.

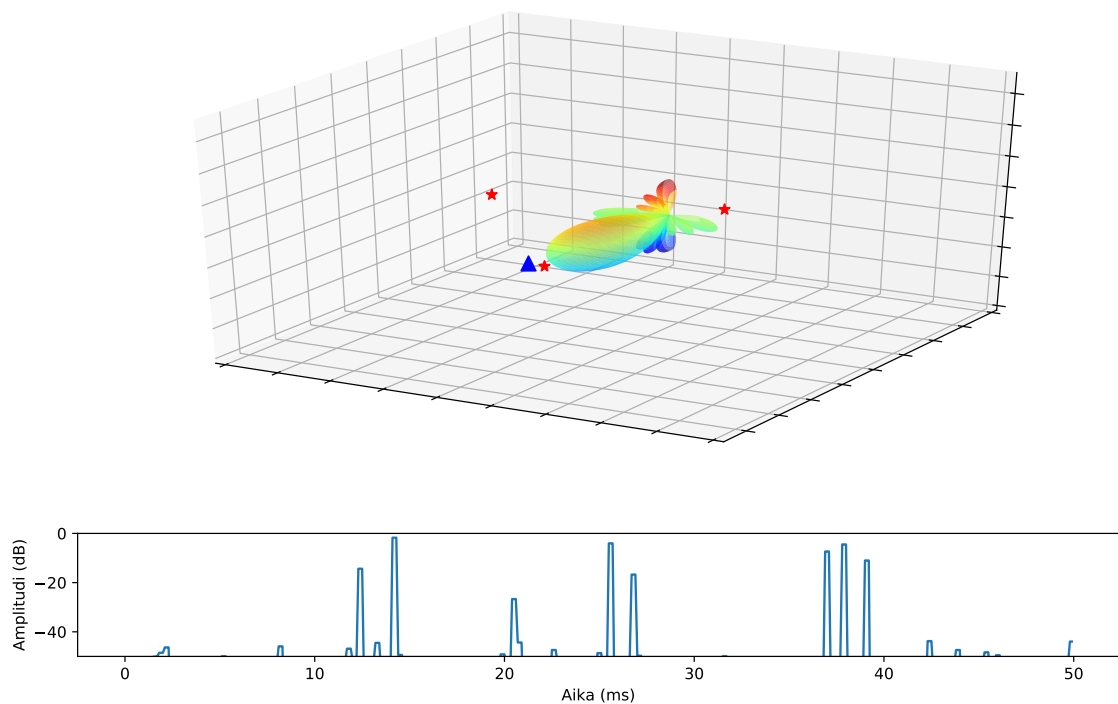
2.1.4 Elektroninen keilaus (engl. *electronic scan*)

Elektronisesti ohjatussa tutkassa tutkan keilaa liikutetaan muuttamalla antenniryhmän antenneille lähetettävän signaalin vaihetta, jolloin keilaa voidaan liikuttaa hyvin nopeasti ja vapaasti paikasta toiseen (kuva 2.4). Hyvien ominaisuuksien vastapainona elektronisesti keilaavia tutkien tekniikka on monimutkaista ja kallista [11, s. 175, 461]. Elektronisella keilauksella tutkan keilaa voidaan siirtää millisekunneissa ääriasennosta toiseen, kun mekaanisesti keilaavilla tutkilla vastaavaan siirtoon kuluu sekunteja. Mitä enemmän elektronisesti keilaavan tutkan keilaa käännetään kohtisuorasta asennosta sivuun, sitä leveämpi tutkan keilasta kuitenkin tulee, jolloin kohteesta saatavan suuntatiedon tarkkuus heikkenee. Keilan elektronisella kääntämisellä on myös äärirajansa. [24, s. 13.1-13.3]

Tutka voidaan rakentaa myös niin, että siinä yhdistetään mekaanista ja elektronista keilausta esimerkiksi siten, että korkeussuuntainen keilaus tehdään elektronisesti ja vaakasuuntainen mekaanisesti. Tällaisia tutkia kutsutaan hybriditutkiksi ja niillä on mahdollisuus paikantaa kohteet kolmiulotteisesti. Tätä tekniikkaa käytetään yleensä valvontatutkissa, mutta myös uudemmissa hävittäjäututkissa. [11, s. 175]

ESM-vastaanottimen amplitudiverhokäyrällä elektronisesti keilaava tutka näkyy voimakkuudeltaan satunnaisina keilauksina, joista ei voi määrittää amplitudihistoriaa vastaavalla tavalla kuin mekaanisesti keilaavilla tutkilla. Jos taas elektronista keilausta käytetään pystysuunnassa samalla, kun tutkan antennia liikutetaan mekaanisesti vaakasuunnassa, saapuu vastaanottimeen tasaisin väliajoin keilauksia, joiden voimakkuus vaihtelee satunnaisesti. Koska tutkan keilaa voidaan liikuttaa selvästi nopeammin kuin mekaanisessa keilauksessa, ovat keilausten amplitudit tasaisempia amplitudiverhokäyrällä kuin mekaanisesti keilaavalla tutkalla. [2, s. 156-157]

Elektronisella keilauksella voidaan sekä seurata, että etsiä kohteita. Kohteiden etsinnäs-

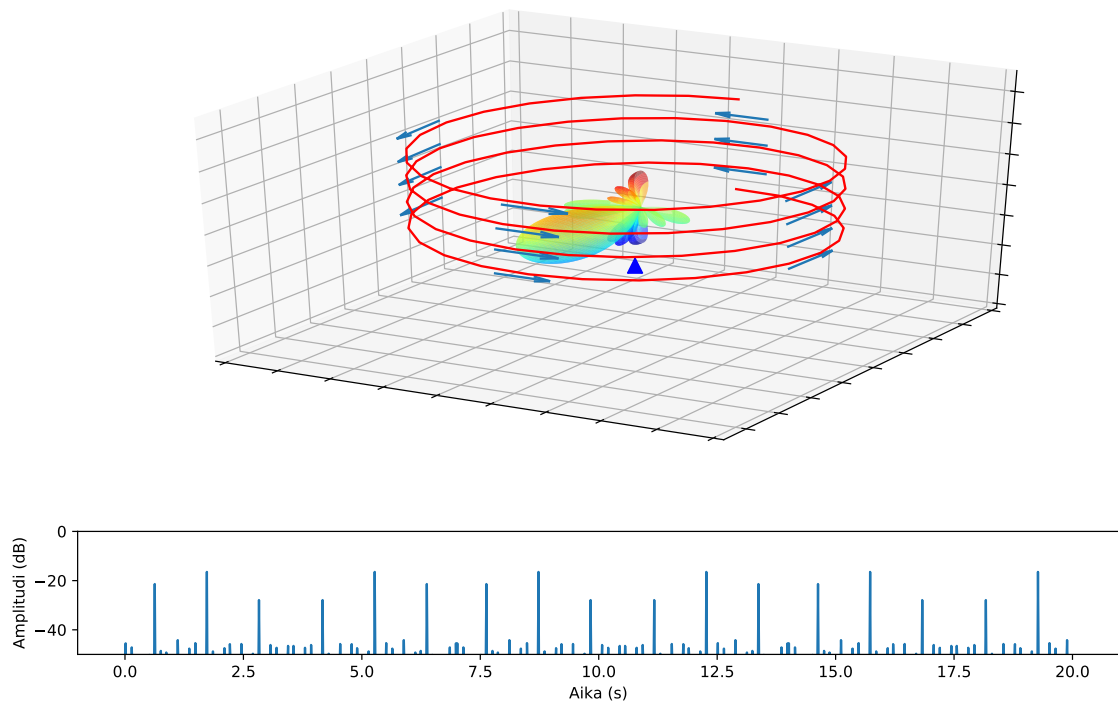


Kuva 2.4. Elektroninen keilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan elektronisesti haluttujen kohteiden välillä (kuvassa merkitty tähtinä). Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten elektronisesti keilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.

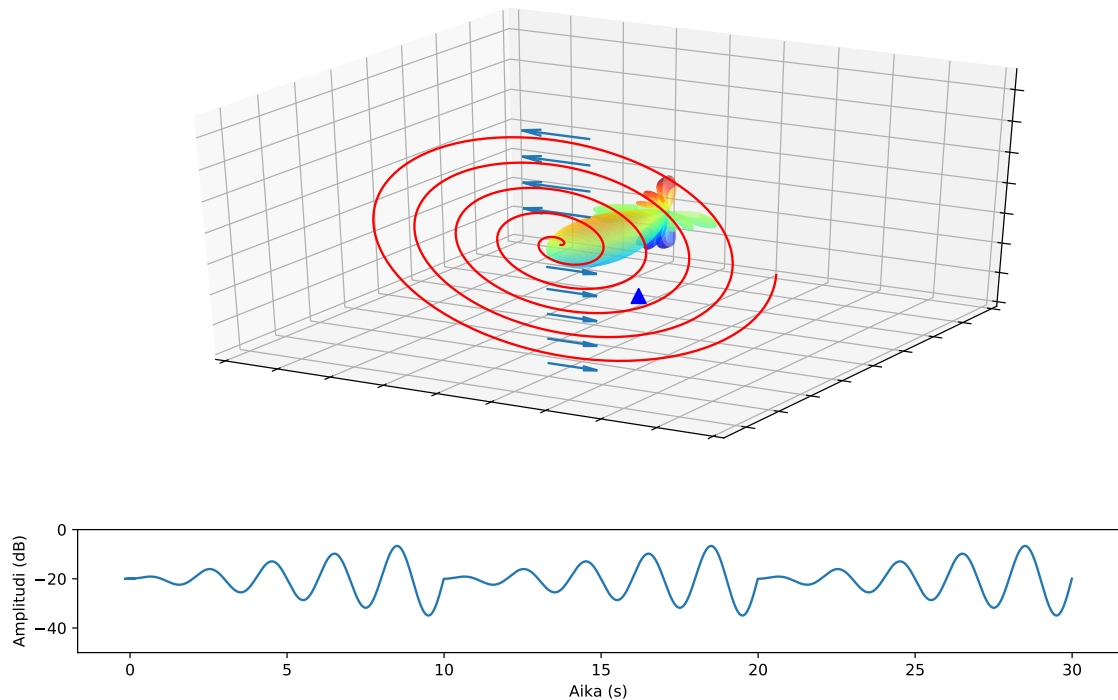
sä keilaa liikutetaan yleensä rasterikeilauksen tapaan. Mielenkiintoisen kohteen löydyttyä keila voidaan kuitenkin pysäyttää tähän kohteeseen pidemmäksi aikaa. Seurantatoiminnossa voidaan löytyneitä kohteita seurata vuoron perään kutakin, ja kohteita voidaan lisätä seurantaan niin kauan, kunnes seurattavien kohteiden maksimimäärä on saavutettu. [26, s. 251]

2.1.5 Ruuvikeilaus (engl. *helical scan*)

Ruuvikeilaus [23] poikkeaa kiertokeilauksesta niin, että keilan korkeuskulmaa muutetaan kierroksesta toiseen, ja saadaan näin aikaan ruuvimainen keilauskuvio (kuva 2.5). Tämä näkyy ESM-vastaanottimen amplitudiverhokäyrällä niin, että pääkeilojen etäisyys toisistaan pysyy vakiona samalla, kun amplitudi vaihtelee jaksollisesti [2, s. 150]. Ruuvikeilauksen parametreina ovat jaksonaika, keilanleveys ja korkeussuunnan kulmarajat. Ruuvikeilausta käytetään kohteiden etsintään [26, s. 245-246].



Kuva 2.5. Ruuvikeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan vaakasuunnassa täysi kierros, ja samalla korkeuskulmaa muutetaan. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten ruuvikeilaavan tutkan signaali ilmenee amplitudiverhokäyrällä.



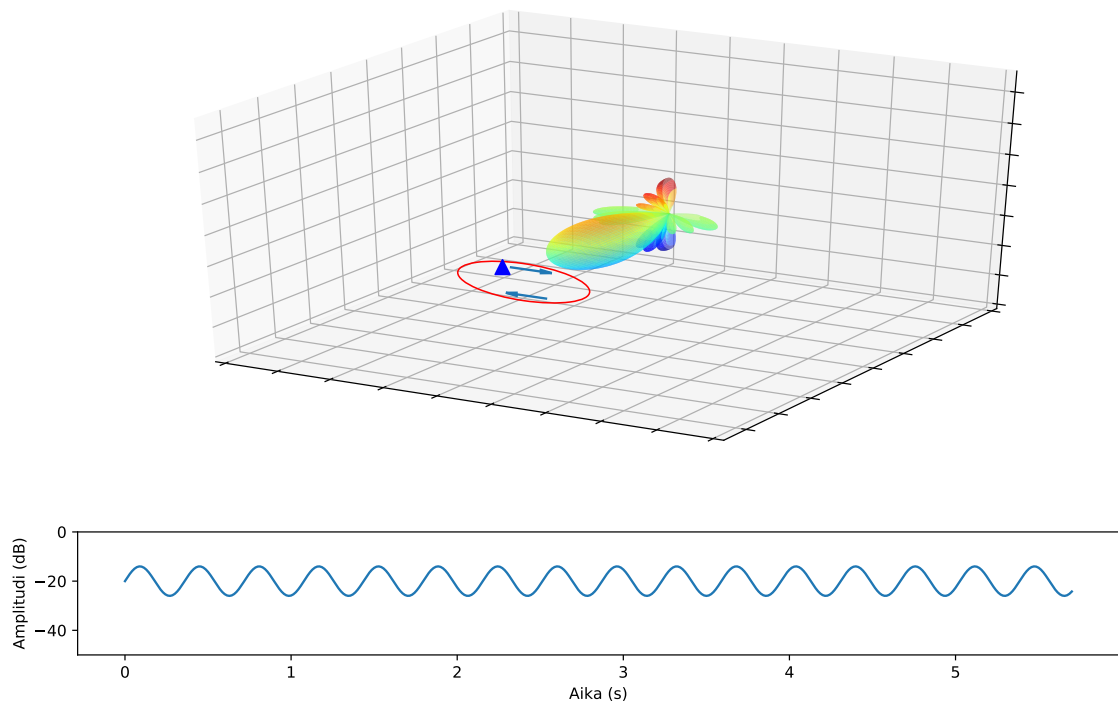
Kuva 2.6. Spiraalikeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan spiraalin muotoista rataa pitkin. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten spiraalikeilaavan tutkan signaali näkyy amplitudiverhokäyrällä.

2.1.6 Spiraalikeilaus (engl. *spiral scan*)

Spiraalikeilauksessa keilaa liikutetaan spiraalin muotoista rataa alkaen keskipisteestä ulospäin (kuva 2.6) [26, s. 246]. Se näkyy ESM-vastaanottimen amplitudikäyrällä sini-muotoisena, mutta amplitudiltaan vaihtelevana käyränä [2, s. 153]. Monet tutkat aloittavat spiraalikeilauksen aina keskipisteestä, mutta toisena vaihtoehtona on spiraalin läpikäyminen edestakaisin. Spiraalikeilausta käytetään joissain lentokoneiden tutkissa kohteita etsittäessä [26, s. 246].

2.1.7 Kartiokeilaus (engl. *conical scan*)

Kartiokeilauksessa tutkan keilaa liikutetaan tietyn kohteen ympärillä (kuva 2.7) [11, s. 214]. Tämä näkyy ESM-vastaanotimessa sinimuotoisena amplitudikäyränä, jonka amplitudivaihtelu pysyy hyvin samanlaisena. Tästä poikkeuksena on tilanne, jossa ESM-vastaanotin on kartiokeilauksen keskipisteessä, jolloin amplitudi on tasainen [2, s. 152]. Kartiokeilausta käytetään kohteen seuraamiseen [26, s. 246].



Kuva 2.7. Kartiokeilaus: Ylhäällä: Tutkan keilaa liikutetaan kohteen ympärillä. Vastaanottimen sijainti on merkitty kolmiolla. Alhaalla: Esimerkki, miten kartiokeilaavan tutkan signaali näkyy amplitudiverhokäyrällä.

Kartiokeilaavaa tutkaa on helppo häiritä, sillä tutkan keilan pyörimisaika on helppo saada selville. Näin ollen kartiokeilauksesta on tehty peitetuksi kartiokeilaukseksi (engl. *Conical Scanning On Receive Only, COSRO*) kutsuttu muunnos, jossa lähetys ei helposti paljasta kartiokeilausta käytettävän. Tämä johtuu siitä, että kartiokeilaus toteutetaan vasta vas-

taanotettaessa kaikuja kohteesta [11, s. 215]. Peitetyn kartiokeilauksen havaitseminen ei ole täysin mahdotonta, mutta se on hyvin hankalaa [26, s. 248].

2.2 Virhelähteet

ESM-vastaanottimessa havaittaviin amplitudiverhokäyriin muodostuu erilaisia epäideaalisuuksia johtuen heijastumisesta, häipymisestä, kohinasta, puuttuvista ja virheellisistä havainnoista ja vastaanotettujen signaalien aiemmassa käsittelyssä tapahtuneista virheistä. Havaintoja jää esimerkiksi puuttumaan, jos ESM-vastaanottimen antennia käännetään. Tällöin antennin vastaanottokulman ulkopuolelle jäävistä tutkista ei saada vastaanotettua signaalia ja signaalia voi jäädä vastaanottamatta pitkäksikin aikaa.

Kohinalla tarkoitetaan kaikkea järjestelmän käyttötarkoituksen kannalta hyötysignaalin vastaanottoa häiritsevää sähköenergiaa. Sitä syntyy kaikissa tutkan signaalin lähetyksen ja vastaanoton vaiheissa, alkaen lähettimen ja vastaanottimen eri osien tuottamasta kohinasta väliaineen tuottamaan kohinaan. Jos vastaanotettava signaali on liian heikko kohinatasoon nähden, jää se piiloon kohinaan. [11, s. 86, 484]

Signaali voi saapua vastaanottimeen useampaa eri reittiä, jolloin on kyseessä monitie-eteneminen. Monitie-eteneminen johtuu signaalin heijastumisesta esimerkiksi ilmakehästä, maanpinnasta tai erilaisista maan pinnalla olevista kohteista [11, s. 70]. Heijastunut signaali on muuten suoraan saapuneen signaalin kaltainen, mutta se saapuu viivästettynä, sillä on eri amplitudi ja sen vaihe poikkeaa ennalta arvaamattomasti suoraan edenneeseen signaaliin nähden [26, s. 177].

Jos toista reittiä saapuvan signaalin vaihe on päinvastainen pääreittiä tulevaan signaaliin nähden, summutuessaan ne kumoavat toisensa ja näin signaali häipyy [11, s. 91]. Näin ollen monitie-eteneminen aiheuttaa amplitudiverhokäyrään häiriöitä niin ylimääräisten kuin puuttuvien pulssienkin muodossa. Ylimääräisiä pulsseja voi ilmetä amplitudiverhokäyrälle myös kohinan seurauksena.

Amplitudiverhokäyrällä voidaan myös havaita kokonaan ylimääräisiä keilauksia tai tutkan kokonaisia keilauksia voi jäädä puuttumaan. Nämä ilmiöt voivat johtua esimerkiksi eri tutkien signaalien erottelussa tapahtuneista virheistä. Tällöin amplitudiverhokäyrällä havaitaan keila joltain toiselta tutkalta tai vaihtoehtoisesti joku analysoitavan tutkan keiloista voidaan erotella virheellisesti jonkin toisen tutkan keilaksi, jolloin kyseinen keila puuttuu amplitudiverhokäyrältä. [10]

2.3 Nykyiset keilaustyyppin tunnistusmenetelmät

Lockheed Martinin vuonna 2004 patentoimassa tutkan keilaustyyppin tunnistusmenetelmässä [9] signaalille tehdään Laplace- ja nopea Fourier'n muunnos (FFT), joiden jälkeen niitä verrataan korreloimalla tietokannassa oleviin näytteisiin, ja samankaltaisimman tie-

tokannassa olevan näytteen luokka annetaan signaalille luokitustulokseksi. Menetelmä ei kuitenkaan ole kovin virhesietoinen keilausparametrien, esimerkiksi keilausajan tai keilan leveyden, muutoksille tietokannan rajatun koon takia. [4, 10]

Patentissa [9] mainittua tietokantaa ei voi laajentaa kovin suureksi, sillä sen koon kasvaessa korrelaatioiden laskeminen vie yhä enemmän aikaa. Lisäksi suurempi tietokanta vaatii myös enemmän tallennustilaa. Näistä syistä patentissa kuvattua menetelmää ei tässä tutkimuksessa tämän enempää käsitellä.

Julkaisuista löytyvistä keilaustyyppien tunnistuksen menetelmistä tarkimmin keilaustyyppien tunnistusmenetelmä on kuvattu Bahaeddin Eravcin tutkimuksissa (opinnäytetyö [7] ja siitä tehty julkaisu [4]). Eravci et al. tutkimusta [4] on näin ollen käytetty kaikkien tässä työssä toteutettujen tunnistusmenetelmien pohjana. Muita kirjallisuudessa esitettyjä tunnistusmenetelmiä ovat Kim et al. [10], Ayazgok et al. [3] ja Li et al. [13] tutkimusten menetelmät.

Taulukossa (2.1) on listattu, mitä keilaustyyppejä eri tutkimuksissa on tunnistettu. Taulukossa (2.2) on listattu käytetäänkö menetelmissä jaksontunnistusta, mitä esikäsittelymenetelmiä, piirteitä ja luokittelumenetelmiä käytetään, sekä kerrotaan mitkä ovat olennaimmat ongelmat tutkimuksissa ja miltä osin menetelmät on toteutettu tässä työssä.

Taulukko 2.1. *Tutkimuksissa tunnistetut keilaustyyppit*

	Eravci et al. [4]	Li et al. [10]	Ayazgok et al. [3]	Li et al. [13]
Kiertokeilaus	X	X	X	
Sektorikeilaus	X	X	X	
Rasterikeilaus	X	X	X	
Ruuvikeilaus	X	X	X	
Spiraalikeilaus			X	
Kartiokeilaus	X		X	
Elektroninen keilaus			X	X
Yksisuuntainen elektroninen keilaus				X
Kaksisuuntainen elektroninen keilaus				X

Keilaustyyppien tunnistus toteutetaan kaikissa edellä mainituissa tutkimuksissa datasta, jossa on esitetty amplitudi kullakin ajan hetkellä. Tutkimuksissa data on muutoin luotu antennin keilaustyyppisimulaattoreilla, mutta Eravci et al. [4] tutkimuksessa on testattu luokitinta myös todellisella ESM-vastaanottimella havaitulla datalla. Tutkimuksissa [3, 4, 13] vastaanotetun signaalin teho on alunperin esitetty dBW-yksikössä (desibeliä suhteessa

Taulukko 2.2. Tutkimuksissa esiteltyjen menetelmien avaintiedot ja tässä diplomityössä toteutetut ratkaisut näistä menetelmistä

	Eravci et al. [4]	Kim et al. [10]	Ayazgok et al. [3]	Li et al. [13]
Jakson-tunnistus	Perustuu auto-korrelaatioon	Käytetty, ei kerrota miten	Sama kuin Eravci et al.	Sama kuin Eravci et al.
Esikäsittely	<ul style="list-style-type: none"> •Normalisointi •Uudelleen-näytteistys •Keskiarvoistus jaksojen yli 	<ul style="list-style-type: none"> •Alipäästö-suodatus •Normalisointi 	<ul style="list-style-type: none"> •Normalisointi •Keskiarvoistus jaksojen yli 	<ul style="list-style-type: none"> •Normalisointi
Piirteet	<ul style="list-style-type: none"> •Huipukkuus h •Pääkeilojen määrä jakson aikana N_k •Amplitudi-vaihtelu s •Aikaerojen suhde u 	<ul style="list-style-type: none"> •Amplitudi-varianssi V_{amp} •Aikaerojen varianssi V_{int} •Aikaerojen erojen varianssi V_{dt} 	<ul style="list-style-type: none"> •Huipukkuus h •Pääkeilojen määrä jakson aikana N_k •Amplitudi-vaihtelu s •Aikaerojen suhde u •Pääkeilan tasaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> •Pääkeila-sekvenssin ensimmäisen ja toisen derivaatan itseisarvon kosinietäisyys •Ensimmäisen derivaatan itseisarvon varianssi
Luokitinratkaisu	Päätöspuu	Päätöspuu	Päätöspuu	Päätöspuu
Olennaisimmat ongelmat	Jakson-tunnistuksen epävarmuus	Puutteellinen kuvaus simulaation, alipäästösuo-datuksen, pääkeilan irrotuksen ja jaksontunnis-tuksen toteutuksesta	Pääkeilan irro-tusmenetelmä on herkkä kohinalle	Simulaatioissa käytettyjä keilauspara-metreja ei kerrota ja luokittelupiir-teiden kuvaus on puutteellista.
Toteutettu tässä diplomityössä	<ul style="list-style-type: none"> •Kierto-, sektori- ja rasterikeilauksen tunnistus •Auto- ja risti-korrelaation laskemiseen tehokkaampi tapa 	<ul style="list-style-type: none"> •Kierto-, sektori- ja rasterikeilauksen tunnistus •Puutteellisesti kuvattuihin kohtiin sovellettu Eravci et al. menetelmää 	Vain pääkeilanirro-tusmenetelmä	Ei toteutettu

wattiin), josta se muutetaan volteiksi kaavalla:

$$x[n] = 10^{(P[n]/20)} n = 0, 1, \dots, N, \quad (2.1)$$

jossa N on havaintojen lukumäärä, P on signaalin teho desibeleinä ja x on signaali muunnettuna volteiksi. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tarkemmin tutkimuksissa esitellyt keilaustyyppien tunnistuksen menetelmät.

2.3.1 Eravci et al. tutkimuksen keilaustyyppien tunnistusmenetelmä

Eravci et al. tutkimuksen [4] keilaustyyppien tunnistusmenetelmä on kuvattu kuvassa 2.8. Tutkimuksessa [4] on luokiteltu kierto- (kuva 2.1), sektori- (kuva 2.2), rasteri- (kuva 2.3), ruuvi- (kuva 2.5) ja kartiokeilaustyyppejä (kuva 2.7) aikatasossa. Tunnistusmenetelmä jakautuu esikäsittelyyn, piirreirrotukseen ja luokitteluun.

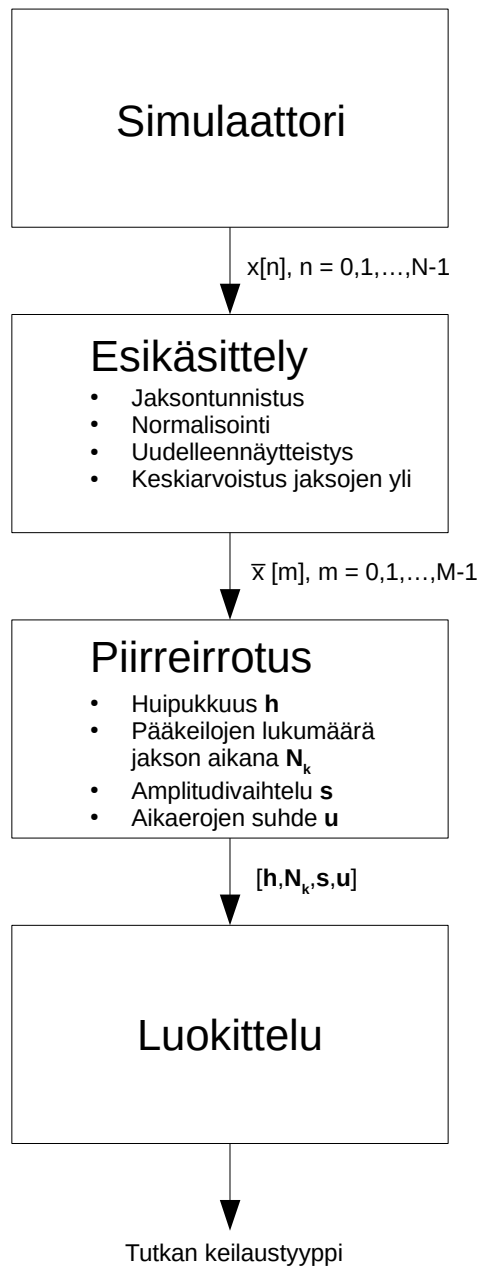
Esikäsittelyssä amplitudiverhokäyrästä tunnistetaan jaksonaika, se normalisoidaan ja uudelleennäytteistetään niin, että joka jakson aikana on saman verran näytteitä. Viimeisessä esikäsittelyvaiheessa signaali keskiarvoistetaan jaksojen yli. Piirreirrotuksessa yhden jakson ajalta signaalia lasketaan neljä piirrettä: jaksonaikainen huipukkuus, pääkeilojen määrä, amplitudien vaihteluväli ja pisimmän ja lyhyimmän keilauksen välisen aikaeron suhde. Näiden perusteella määritetään keilaustyyppi. Huipukkuus on tilastollinen suure, joka kertoo kuinka terävähuippuinen tai tasainen jonkun satunnaismuuttujan, eli tässä tapauksessa signaalin, jakauma on.

Amplitudiverhokäyrät on luotu Matlabilla toteutetulla tutkan keilaustyyppisimulaattorilla. Tutka-antenni on mallinnettu lineaarisena antenniryhmänä, joka voidaan ikkunoida Blackman-, Hamming-, kolmio-, Poussin- tai Taylor-ikkunoilla. Tutkan keilanleveys voidaan määrittää asteina korkeus- ja vaakasuunnassa. Lisäksi simulaattorilla voidaan vaihdella keilausparametreja.

Käytetyt keilausparametrit

Eravci et al. tutkimuksessa [4] antennin keilaustyyppisimulaattorissa tuotettiin 20 erilaista keilauskuviota jokaisesta tutkimuksessa mallinnetusta keilaustyyppistä (kierto-, sektori-, rasteri-, ruuvi-, ja kartiokeilaus) vaihtelemalla parametreja tasaisen satunnaisesti taulukon 2.3 mukaisesti. Sektori-, rasteri- ja ruuvikeilauksessa ESM-vastaanotin on sijoitettu satunnaisesti eri paikkoihin ja kartiokeilauksessa satunnaisesti tutkan seurannassa olevan kohteen läheisyyteen.

Taulukoidut parametrit käsittävät keilausparametrit, mutta käytettyjä simuloidun tutkan parametreja ei kerrota. Näihin kuuluvat tutkan sivukeilatase ja keilanleveys. Myöskään amplitudiverhokäyrien luonnissa käytettyä näytteenottotaajuutta ei kerrota.



Kuva 2.8. Eravci et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä. Simulaattorista saatu amplitudiverhokäyrä esikäsitellään, jonka jälkeen siitä irrotetaan luokittelussa käytettävät piirteet. Piirteiden perusteella amplitudiverhokäyrä luokitellaan ja luokittelutuloksena saadaan tutkan keilaustyyppi.

Esikäsittely

Eravci et al. tutkimuksessa [4] signaalin esikäsittely käsittää jaksontunnistuksen sekä signaalin normalisoinnin, uudelleennäytteistyksen ja keskiarvoistuksen jaksojen yli. Ensimmäisenä vaiheena signaalista $x[n]$ määritellään nolliksi kaikkien niiden näytteiden arvot,

Taulukko 2.3. Antennin keilaustyyppisimulaattorissa käytettyjen keilausparametrien vaihteluvälit Eravci et al. tutkimuksessa [4]

Keilaustyyppi	Keilausjakson aika (s)	Vaakakulma °	pystykulma °
Kierto	1-10	0-360	0
Sektori	1-10	0-180	0
Rasteri	1-10	0-180	0-10
Ruuvi	0,01-0,2	0-360	0-10

jotka ovat alle vastaanottimen herkkyytason. Herkkyytaso sijoitetaan 10 dB korkeammalle kuin kohinataso. Tämän jälkeen signaalista $x[n]$ estimoidaan jaksonaika.

Jakso estimoidaan aikatasossa. Aikataason menetelmät ovat hyödyllisiä muille kuin sini-muotoisille signaaleille. Aikataason menetelmistä käytetään normalisoitua autokorrelaatiota:

$$r_{xx}[l] = \frac{\sum_{n=0}^{W-1} x[n]x[n+l]}{\sqrt{\sum_{n=0}^{W-1} (x[n])^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{W-1} (x[n+l])^2}}, \quad (2.2)$$

jossa l on viiveen määrä ja W on ikkunan koko. Ikkunana on käytetty kolmasosaa käsiteltävän signaalin pituudesta. Jakson estimointia varten oletetaan, että vähintään kaksi täyttä jaksoa on tarjolla signaalissa kohinan vaikutusten vähentämiseksi. Tutkimuksessa ei määritetä ajallista kynnystä, joka rajaisi sitä, kuinka pitkältä signaalilta jaksoa tunnistettaisiin.

Jakson estimoinnin jälkeen signaali normalisoidaan. Normalisointi tehdään, jotta amplitudin vaihteluväli ei vaikuttaisi luokittelutulokseen. Normalisoinnissa jokainen signaalin arvo jaetaan signaalin maksimiarvolla, ja näin signaalin normalisoidut arvot vaihtelevat nollan ja yhden välillä.

Koska tutkien pulssintoistovälit ja tutkien keilausten jaksonajat vaihtelevat, uudelleennäyteistetään signaali niin, että jokaisella jaksolla on saman verran näytteitä. Tutkimuksessa oletetaan, että näytteet ovat eri amplitudiverhokäyrissä tasavälein, mutta välit eivät välttämättä ole samat. Uudelleennäyteistyksen jälkeen piirteet eivät riipu näytteenottotaajuudesta tai jaksonajasta. Uudelleennäyteistys on toteutettu digitaalisesti lähimmän naapurin menetelmällä, joka on menetelmänä laskennallisesti yksinkertainen. Lisäksi oletetaan, että näytteenottotaajuus on ollut suuri. Tällöin uudelleennäyteistyksessä näytteiden määrää vähennetään eli signaalia desimoidaan, eikä lähimmän naapurin menetelmä tuota

signaaliin huomattavia häiriöitä. Uudelleennäytteistys toteutetaan kaavalla:

$$\begin{aligned} x_r[m] &= x_n \left[\left\lfloor \left(\frac{mT_o}{T_s} \right) \right\rfloor \right] \\ m &= 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{(N-1)T_s}{T_o} \right\rfloor, \end{aligned} \quad (2.3)$$

jossa T on tutkan jaksonaika, T_s on näytteenottotaajuus, $T_o = \frac{T}{M}$, on uusi näytteenotto-taajuus, jolla yhdellä jaksolla on M kappaletta näytteitä. M :n arvoja 250, 500, 1000, 2000 ja 4000 on tutkittu ja tutkimuksessa todetaan parhaana kompromissina luokittelutarkkuu-den ja laskenta-ajan välillä M :n arvon olevan 1000 näytettä. Keskiarvoistaminen jaksojen yli toteutetaan kaavalla:

$$\bar{x}[m] = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x_r[m + kM], \quad (2.4)$$

jossa K on täysien jaksojen lukumäärä. Piirreirrotuksessa käytetään tätä normalisoitua, uudelleennäytteistettyä ja jaksojen yli keskiarvoistettua signaalia $\bar{x}[m]$.

Piirreirrotus

Eravci et al. tutkimuksessa [4] piirteinä oli kokeiltu muun muassa esikäsitellyn signaalin $\bar{x}[m]$ keskiarvoa, keskihajontaa ja vinoutta, mutta seuraavat neljä piirrettä tuottivat parhaat tulokset:

1. Huipukkuus h
2. Pääkeilojen lukumäärä jakson aikana N_k
3. Pääkeilojen amplitudin vaihtelu s
4. Pääkeilojen välisistä aikaeroista pisimmän ja lyhyimmän suhde u

Huipukkuudella saadaan eroteltua kartiokeilaus (kuva 2.7) muista, sillä kartiokeilaukses-sa pyritään valaisemaan kohdetta mahdollisimman paljon, ja näin ollen ESM-vastaan-ottimeen tulevassa amplitudidatassa amplitudiin vaihtelu on pientä. Näin ollen kartio-keilauksen ollessa kyseessä, huipukkuuden arvo on pieni, ja muissa tapauksissa se on merkittävästi suurempi.

Pääkeilojen lukumäärästä jakson aikana voidaan erottaa kiertokeilaus (kuva 2.1) jäljel-lä olevista keilaustyypeistä, sillä kiertokeilauksessa pääkeila osoittaa ESM-vastaanotinta kohti vain kerran jakson aikana, kun muissa keilaustyypeissä pääkeila osoittaa kohti ESM-vastaanotinta joko suoraan tai vinosti useamman kerran. Pääkeilojen amplitudin vaihtelusta voidaan erottaa sektorikeilaus (kuva 2.2) jäljellä olevista, sillä sektorikeilauk-sessa amplitudi pysyy suunnilleen vakiona. Pääkeilojen välisistä aikaeroista voidaan erot-

taa rasterikeilaus (kuva 2.3) ja ruuvikeilaus (kuva 2.5) toisistaan, sillä rasterikeilauksessa keilojen väliset ajat vaihtelevat selvästi enemmän kuin mitä ne tekevät ruuvikeilauksessa, jossa ne pysyvät kiertoikeilauksen tapaan lähes vakiona.

Huipukkuus lasketaan kaavalla:

$$h = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} (\bar{x}[m] - \mu)^4}{\sigma^4}, \quad (2.5)$$

jossa h on huipukkuus, $\bar{x}[m]$ on yksi signaalin näyte, M on näytteiden määrä signaalissa, μ on signaalin keskiarvo ja σ on keskihajonta.

Loput piirteet riippuvat jaksonaikaisten pääkeilojen ominaisuuksista ja näin ollen myös pääkeilojen irrotuksen onnistumisesta. Eravci et al. tutkimuksessa [4] on pääkeilasekvenssi $y[n]$ määritelty yhden jakson mittaiselta signaalilta etsimällä ensin maksimiampplitudi, ja rajaamalla pääkeila muusta signaalista siten, että pääkeilaan kuuluu maksimia ympäröivä alue siihen asti kummaltakin puolelta, kunnes normalisoitu amplitudi laskee 0.01:een.

Kun on löydetty pääkeila, jolla on suurin maksimiampplitudi, etsitään muut pääkeilat normalisoidulla ristikorrelaatiolla:

$$r_{xy}[l] = \frac{\sum_{n=0}^{V-1} \bar{x}[n+l]y[n]}{\sqrt{\sum_{n=0}^{V-1} (\bar{x}[n+l])^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{V-1} (y[n])^2}}, \quad (2.6)$$

jossa $l = 0, 1, \dots, N - V$. V on pääkeilasekvenssin pituus, \bar{x} on yhden jakson mittainen keskiarvoistettu ja normalisoitu osuus signaalista 2.4 ja $y[n]$ on pääkeilasekvenssi. Ristikorrelaation tulos kynnystetään ja kynnysarvoa voidaan muuttaa ottamaan huomioon keilan korkeussuuntaisen vaihtelun tuottamat vaikutukset amplitudiverhokäyrällä. Esimerkkiarvoksi kynnysarvolle annetaan 0.95. Pääkeilojen sijainniksi valitaan kynnystetyn ristikorrelaation paikallisten maksimien sijainnit $t_{peak}[k]$, $k = 0, 1, \dots, N_k - 1$.

Ensimmäinen pääkeilojen ominaisuuksiin perustuva piirre on pääkeilojen lukumäärä jakson aikana N_k . Pääkeilojen amplitudivaihtelu (s) lasketaan maksimiampplitudin ja minimiampplitudin erotuksena:

$$s = \max(\bar{x}[t_{peak}[k]]) - \min(\bar{x}[t_{peak}[k]]), \quad (2.7)$$

jossa s on amplitudivaihtelu. Pääkeilojen välisistä aikaeroista pisimmän ja lyhyimmän aikaeron suhteen laskemisessa keilausten väliset ajat ($\tau[k]$) lasketaan ensin kaavalla:

$$\tau(k) = t_{peak}[k+1] - t_{peak}[k], \quad (2.8)$$

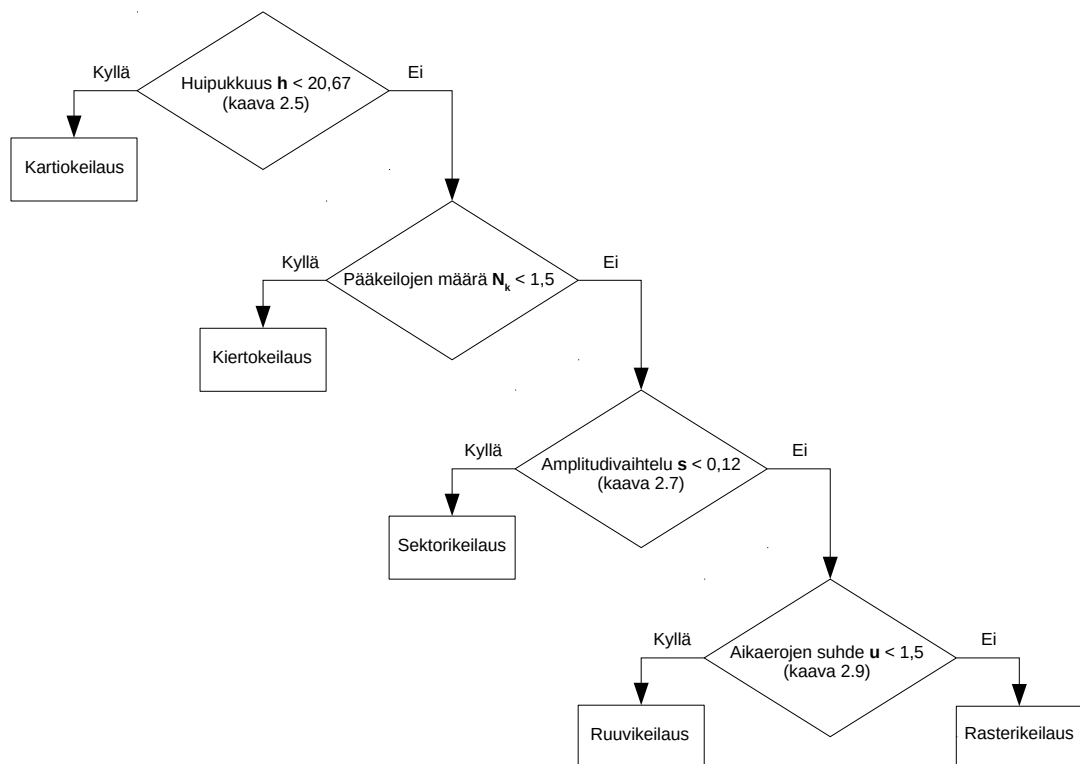
jonka jälkeen pisimmän ja lyhyimmän aikaeron suhde u lasketaan kaavalla:

$$u = \frac{\max(\tau[k])}{\min(\tau[k])}. \quad (2.9)$$

Luokittelu

Eravci et al. tutkimuksessa [4] on tutkittu luokitteluun naivia Bayesiläistä luokittelijaa, päätöspuuta, neuroverkkoa, ja tukivektorikonetta. Ideaalisessa tapauksessa tuhannella näytteellä jakson aikana on näytteistä tunnistunut naivilla bayesiläisellä luokittimella 98%, päätöspuulla (kuva 2.9) 100%, neuroverkolla 99% ja tukivektorikoneella 99% oikein. Signaali-kohinasuhteella 20 dB, Naivi bayesiläinen luokitin luokitteli 77% näytteistä oikein, päätöspuu 77%, neuroverkko 70% ja tukivektorikone 75%. Näistä luokittelumenetelmistä päätöspuu on valittu parhaimmaksi.

Päätöspuu on nopea ja helposti visualisoitavissa oleva luokittelumenetelmä [4, 13]. Päätöspuun ylintä solmua kutsutaan juurisolmuksi, josta luokittelu myös lähtee etenemään pitkin puuta alaspäin. Jokaisessa solmussa jotain piirteistä testataan ja tuloksesta riippuen luokittelutulos etenee sitä vastaavaan haaraan. Tätä toistetaan niin kauan, kunnes ollaan lehtisolussa, joka antaa luokittelutuloksen. Päätöspuuta opetettaessa parhaiten näytteitä jakavasta piirteestä pyritään saamaan juurisolun päätöskriteeri. [18, s. 52-55]



Kuva 2.9. Eravci et al. tutkimuksen päätöspuu

2.3.2 Kim et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä

Kim et al. tutkimuksessa [10] on luokiteltu kierto-, sektori-, rasteri- ja ruuvikeilaavia tutkia käyttäen piirteinä keilausten amplitudien varianssia ja keilausten välisten aikojen varianssia. Lisäksi keilausten välisten aikaerojen varianssia on käytetty luokittelemaan virheellisesti rasterikeilaukseksi luokiteltuja näytteitä luokittelemattomiksi. Tutkimuksessa on analysoitu samalla myös kohteen liikkeen vaikutusta luokittelutulokseen. Tutkimuksessa käytetään vähemmän piirteitä kuin Eravci et al. [4] tutkimuksessa, mutta varianssien laskeminen vaatii ajallisesti pidemmän signaalin [3].

Kutakin neljää keilaustyyppiä (kierto-, sektori-, rasteri- ja ruuvikeilaus) on simuloitu 50 amplitudiverhokäyrää, joita on testattu signaali-kohinasuhteilla 10, 20 ja 30 dB. Amplitudiverhokäyriin kerrotaan lisätyn puuttuvia ja ylimääraisiä pulsseja, mutta keilaustyyppien parametreja tai näiden parametrien vaihteluvälejä ei ole kerrottu. Simulaatioissa signaalia lähettävää tutkaa on liikutettu vakionopeudella 400 m/s kolmessa eri kulmassa (5°, 45° ja 60°) vastaanottimeen nähden. Alkuperäinen etäisyys vastaanottimen ja tutkan välillä on 20 km suunnassa -45°.

Kim et al. tutkimuksessa [10] amplitudiverhokäyrä aluksi alipäästösuodatetaan tavallisilla alipäästösuodattimilla. Tämän jälkeen signaalista tunnistetaan pääkeilat, jotka normalisoidaan korkeimman pääkeilan perusteella kunkin jakson ajalta. Sitä, miten pääkeilat on tunnistettu tai jaksonaika on määritetty, ei kerrota. Tämän jälkeen tutkimuksessa käytetyt piirteet lasketaan kolmen jakson ajalta.

Piirteinä on käytetty amplitudivarianssia, keilausten välisten aikaerojen varianssia ja keilausten välisten aikaerojen erojen varianssia. Keilausten amplitudien varianssi lasketaan kaavalla:

$$V_{amp} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=0}^{N_k-1} (a_{peak}(k) - \bar{a}_{peak})^2, \quad (2.10)$$

jossa N_k on keilausten määrä kolmen jakson ajalta signaalia, $a_{peak}[k]$ on keilausten maksimiampplitudi ja \bar{a}_{peak} on maksimiampplitudien keskiarvo. Tämän jälkeen keilausten välisten aikaerojen varianssi lasketaan kaavalla:

$$V_{int} = \frac{1}{N_k - 1} \sum_{k=0}^{N_k-2} (\tau(k) - \bar{\tau})^2, \quad (2.11)$$

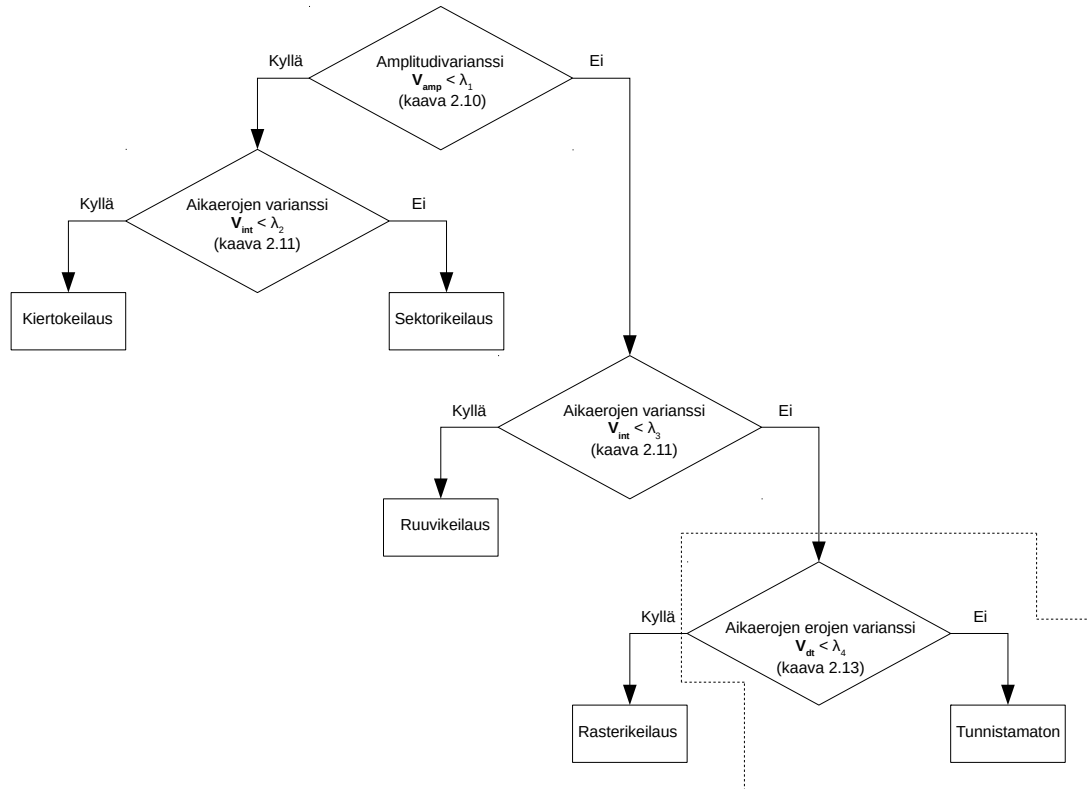
jossa $\tau[k]$ lasketaan kaavalla 2.8 ja $\bar{\tau}$ on keilausten välisten aikaerojen keskiarvo. Keilausten välisten aikaerojen erot lasketaan kaavalla:

$$d\tau[k] = \tau_{peak}[k+1] - \tau_{peak}[k], \quad (2.12)$$

jonka jälkeen keilausten välisten aikaerojen erojen varianssi kaavalla:

$$V_{d\tau} = \frac{1}{N_k - 2} \sum_{k=0}^{N_k-3} (d\tau(k) - \overline{d\tau})^2, \quad (2.13)$$

jossa $\overline{d\tau}$ on keilausten välisten aikaerojen erojen keskiarvo.



Kuva 2.10. Kim et al. tutkimuksen päätöspuu. Katkoviivalla rajattu alue on keilausten välisten aikaerojen erojen varianssiin perustuva piirre, jonka tavoitteena on luokitella virheelliset rasterikeilaustunnistukset tunnistamattomiksi.

Kim et al. tutkimuksessa [10] on luokittelussa käytetty päätöspuuta, jonka rakenne on kuvattu kuvassa 2.10. Tutkimuksessa on luokiteltu näytteitä vain niin, että lähetin tai vastaanotin liikkuu. Sen sijaan Eravci et al. tutkimuksessa [4] on oletettu, että sekä vastaanotin että signaalia lähettävä tutka ovat paikallaan, joten tutkimusten tulokset eivät näin ollen ole vertailukelpoisia.

2.3.3 Ayazgok et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä

Ayazgok et al. tutkimuksessa [3] käytetään pääosin samaa esikäsittelyprosessointia kuin luvussa 2.3.1 kuvatussa Eravci et al. tutkimuksessa [4]. Erona on, että amplitudiverho-

käyrien oletetaan olevan jo uudelleennäytteistetty niin, että vastaanotettu signaali vastaa kiinteällä pulssintoistovälillä toimivaa tutkaa. Esikäsittelystä on jätetty Eravci et al. tutkimuksen uudelleennäytteistysvaihe pois.

Ayazgok et al. [3] tutkimuksessa huomautetaan, että Eravci et al. tutkimuksen [4] kynnystämiseen perustuvalla pääkeilan irrotusmenetelmällä on vaikea erottaa signaaleja, jotka ovat hyvin lähellä toisiaan. Tämän ongelman ratkaisuksi tutkimuksessa esitetään autokorrelaatioon perustuvaa algoritmia pääkeilan erottamiseksi kynnystämällä saadusta pääkeilasekvenssistä $y[n]$. Autokorrelaatio on tutkimuksessa [3] laskettu kaavalla:

$$R_x[l] = \begin{cases} \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-l} y[n]y[n+l]}{\sum_{n=0}^{N-1-l} (y[n])^2} & 0 \leq l < V \\ R_y^*[-l] & -N \leq l < 0 \end{cases}, \quad (2.14)$$

jossa V on kynnystämällä saadun pääkeilasekvenssin pituus.

Saadun autokorrelaation maksimiarvo on nollaviiveen kohdalla, josta molemmin puolin nollaviivettä autokorrelaation kulmakertoimen eli derivaatan merkki vaihtuu jollain viiveen arvolla. Nämä kohdat, joissa kulmakertoimen merkki vaihtuu, ovat yhteydessä todellisen pääkeilasekvenssin leveyteen. Mekaanisesti keilaavilla tutkilla pääkeilan leveys on signaalissa R_x etäisyys negatiivisten viiveiden puolelta siltä kohdalta, jossa kulmakertoimen merkki vaihtuu, positiivisten viiveiden vastaavaan kohtaan. Tätä etäisyyttä merkitään $T1$:nä. Elektronisesti keilaavilla tutkilla pääkeilan leveys on itseisarvo viiveen määrästä kulmakertoimen merkin vaihtumiskohtaan joko positiivisella tai negatiivisella puolella. Tätä etäisyyttä merkitään $T2$:nä.

Kohinan takia autokorrelaation derivaatta on alipäästösuodatettava ja lisäksi kohina saa derivaatan vaihtamaan merkkiään lähellä nollaviivettä, joten nämä on eliminointava oikeiden derivaatan merkinvaihtumiskohtien löytämiseksi. Kun leveydet on saatu määritettyä, etsitään kynnystämällä saadusta pääkeilasekvenssistä kummallakin leveydellä $T1$ ja $T2$, ja valitaan uudeksi pääkeilasekvenssiksi se osuus, jossa tehotiheys on suurin.

Luokittelussa on laajennettu Eravci et al. [4] tutkimusta spiraali- ja elektronisen keilauksen tyypeillä. Elektroninen keilaus erotetaan mekaanisesta keilauksesta pääkeilojen pulssien amplitudien tasaisuuden perusteella. Spiraalikeilaus erotetaan jaksonaikaisten pääkeilojen lukumäärän perusteella kartiokeilauksesta sen jälkeen, kun spiraali- ja kartiokeilaus on erotettu muista huipukkuuden perusteella. Luokitteluun on käytetty päätöspuuta, jonka päätösehtoisiin on lisätty ehdot myös elektronisen keilauksen ja spiraalikeilauksen tunnistukselle. Muutoin päätöspuu on samanlainen, kuin Eravci et al. tutkimuksessa [4].

Luokitinta on testattu simuloimalla kutakin keilaustyyppiä 16 amplitudiverhokäyrää Matlabilla toteutetulla tutkan keilaustyyppisimulattorilla. Kustakin näistä amplitudiverhokäyristä on Monte Carlo -simulaatiolla luotu 160 jaksoa, joita on luokiteltu signaali-kohinasuhteilla 25, 20 ja 15 dB. Eri keilaustyypeillä käytetyistä parametreista on taulukoitu kullakin keilaustyyppillä käytetty keilanleveys, jaksonaika ja sektorin koko. Lisäksi on ilmoitettu ruuvi-keilauksen kierrosten lukumäärä, elektronisten keilausten kohteiden lukumäärä ja valai-

suaika, sekä rasterikeilauksen linjojen lukumäärä.

2.3.4 Li et al. tutkimuksen keilaustyyppin tunnistusmenetelmä

Li et al. tutkimuksen [13] tavoitteena on tunnistaa elektroninen keilaus tutkasta, joka keilaa korkeussuunnan elektronisesti ja vaakasuunnan mekaanisesti. Tätä tarkoitusta varten on tutkimuksessa tehty tutkan keilaustyyppisimulaattori Matlab-ohjelmistolla. Tutkimuksessa on simuloitu opetusjoukoksi kaksisuuntaista elektronista keilausta, yksisuuntaista elektronista keilausta ja mekaanista keilausta kutakin 20 amplitudiverhokäyrää ja testiaineistoksi vastaavasti kutakin edellä mainittua keilaustyyppiä 100 amplitudiverhokäyrää. Näissä esimerkiksi jaksoa, painoarvoja ja kulmia on muutettu eri näytteissä vastaamaan todellisuudessa tapahtuvia muutoksia, mutta tämän tarkemmin käytettyjä parametrivälejä ei ilmoiteta.

Esikäsittelyssä ja piirreirrotuksessa signaali $x[n]$ ensin uudellennäytteistetään niin, että näytteet ovat tasavälein. Tämän jälkeen signaali normalisoidaan ja sen jälkeen siitä tunnistetaan jakso. Jakso tunnistetaan samoin kuin Eravci et al. tutkimuksessa [4]. Tämän jälkeen esitellään pulssintoistovälin kynnystykseen perustuva pääkeilanirrotusmenetelmä. Kun tutka keilaa johonkin muuhun suuntaan kuin kohti ESM-vastaanotinta, pulsseja jää vastaanottamatta pidemmän aikaa, kuin mikä tavanomainen pulssintoistoväli tutkalla olisi. Tämän perusteella erotetaan keilaus muusta signaalista.

Tutkimuksessa käytetyt piirteet perustuvat irrotetun pääkeilasekvenssin ensimmäiseen ja toiseen derivaattaan perustuviin piirteisiin. Elektroninen keilaus tunnistetaan pääkeilasekvenssin ensimmäisen ja toisen derivaatan itseisarvojen kosinietäisyyden perusteella. Mekaanisilla keilaustyypeillä tämä etäisyys on pienempi kuin elektronisella keilauksella.

Yhdensuuntainen elektroninen keilaus erotetaan kaksisuuntaisesta elektronisesta keilauksesta laskemalla ensimmäisen derivaatan johonkin kohtaan asetetun kynnyksen alapuolisten arvojen varianssi. Kynnykselle ei anneta tutkimuksessa lukuarvoa. Kaksisuuntaisella elektronisella keilauksella tämän varianssin mainitaan olevan pienempi, kuin yksisuuntaisella elektronisella keilauksella. Luokittelumenetelmänä käytetään päätöspuuta.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Työssä toteutetaan suuri määrä simuloitteja eri keilaustyypeistä ja testataan niiden avulla kirjallisuudesta löytyneitä ja niiden pohjalta suunniteltuja signaalinkäsittelymenetelmiä. Simuloimalla pyritään kvantitatiiviseen analyysiin, jossa on kyetty ottamaan huomioon riittävä vaihtelu tutkan keilaustyyppien ilmenemisessä ja tämän perusteella määrittää toteutettujen menetelmien kyky tuottaa tavoiteltu tulos. Yhtä hyvään analyysiin ei päästäisi muutamalla todellisella mittauksella, sillä mittauksilla ei saataisi katettua erilaisten keilaustyyppien vaihtelua yhtä hyvin kuin simulaatioilla.

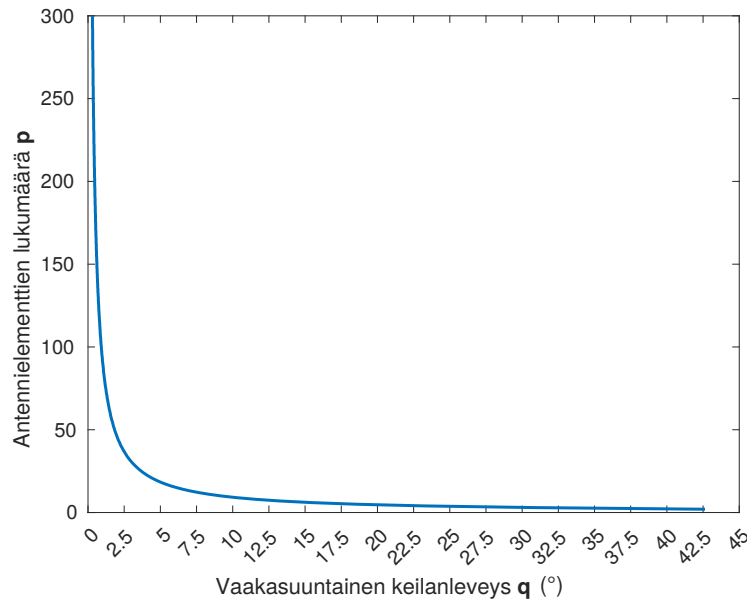
Todellinen ESM-vastaanotin ei kuitenkaan vastaanota simuloitua dataa, vaan todellisia signaaleja. Näin ollen on myös kerättävä todellisia mittauksia, jotta voidaan saada selville, miten hyvin simulaatiot vastaavat todellisuutta. Näihin mittauksiin perustuva tutkimus on kuitenkin rajattu tämän diplomityön ulkopuolelle.

3.1 Tutkan keilaustyyppisimulaattori

Tässä työssä kehitettiin Matlabilla tutkan keilaustyyppisimulaattori. Simulaattori koostuu antennin säteilykuvion luomisesta ja tutkan keilaustyyppin mukaisen liikeradan mallintamisesta. Tällä simulaattorilla on luotu tässä työssä käytetyt amplitudiverhokäyrät.

Simulaattorissa mallinnetaan tutka-antenni lineaarisena antenniryhmänä, joka voidaan ikkunoida kolmio-, Hamming-, Taylor-, Poussin- ja Blackman-ikkunoilla ja vaikuttaa näin sivukeilojen tasoon. Antennit mallinnetaan tavallisesti lähettämisen kannalta, mutta säteilykuvio on samanlainen myös vastaanotettaessa [11, s. 454]. Vastaanottimen oletetaan vastaanottavan signaaleja tasaisella vahvistuksella joka suunnasta.

Simulaattorille annetaan haluttu pääkeilan leveys niin korkeus- kuin vaakasuunnassa, ja näiden perusteella ohjelma laskee tarvittavien antennielementtien lukumäärän kyseisen pääkeilan leveyden saavuttamiseksi. Vaakasuuntaisen keilanleveyden määrittämisenäisyyttä varten on simulaattoriin toteutettu ominaisuus, jolla on mahdollista laskea keilan leveys eri ikkunoilla. Keilanleveydet on laskettu 2-300 antennielementillä, sillä tällä välillä saadaan selville miten keilan leveys käyttäytyy antennielementtien funktiona (kuva 3.1).



Kuva 3.1. Antennielementtien lukumäärä vaakasuuntaisen keilanleveyden funktiona

Kuvan 3.1 käyrään on sovitettu funktio muotoa:

$$p = a + \frac{b - a}{\left(1 + \frac{q}{c}\right)^d}, \quad (3.1)$$

jossa q on 3 dB:n keilan leveys, p on antennielementtien lukumäärä ja a , b , c ja d ovat funktion parametreja. Haluttu keilanleveys annetaan tämän jälkeen funktiolle parametrina ja loput parametrit valitaan käytetyn ikkunan perustella. Tulokseksi saadaan tarvittavien antennielementtien lukumäärä.

Korkeussuuntainen keilanleveys määritellään skaalaamalla z -koordinaattia. Esimerkiksi, jos halutaan keilan leveys kaksinkertaiseksi korkeussuunnassa leveyssuuntaan nähden, jaetaan tutkan keilan suuntavektorin z -koordinaatti kahdella.

Kun antennin elementtien lukumäärä ja sivukeilatason määräävä ikkuna on määritetty, luodaan säteilykuvio antennielementtien arvojen diskreetillä Fourier-muunnoksella [14, s. 594-596]. Antennielementtien arvot riippuvat käytetystä ikkunasta. Jos ikkunointia ei ole käytetty, kunkin antennielementin arvo on 1. Diskreetti Fourier'n muunnos toteutetaan FFT-algoritmilla ja antennielementtien perään lisätään nollia ennen muunnosta niin paljon, että muunnoksesta saatavan vektorin pituudeksi saadaan 2^{14} eli 16384. Kutakin FFT-muunnoksen pistettä kohti lasketaan sitä vastaava kulma kaavalla:

$$\Theta[n] = 2 \arcsin \frac{n}{8192}, \quad (3.2)$$

jossa $n = [-8192 \ 8191]$ ja $\Theta[n]$ on valittua n :n arvoa vastaava kulma. Kukin saatu kulman arvo on välillä -180 asteesta $+180$ asteeseen ja vastaa kulmaetäisyyttä antennin säteilymaksimista (kulma 0°) katsoen.

Parametreina simulaattorille on mahdollista antaa:

- Aika: alku, loppu ja askel
- Keilaustyyppi: kierto-, ympyrä- tai rasterikeilaus
- Tutkan ja vastaanottimen sijainti: x , y - ja z -koordinaatit
- Keilauksen jaksonaika
- Keilausalue: ääriajat kulmina vaaka- ja pystysuunnassa
- Keilanleveys: pysty- ja vaakasuunnassa
- Ikkuna: kolmio, Hamming, Taylor, Poussin ja Blackman tai ei ikkunaa
- Signaali-kohinasuhde
- Ylimääräisten keilojen määrä prosentteina
- Puuttuvien keilojen määrä prosentteina

Simulaattorille annetaan tutkan ja vastaanottimen sijainti x -, y - ja z -koordinaatein, ja näytteenottohetket. Kullakin näytteenottohetkellä määritetään, mihin suuntaan tutkan pääkeila osoittaa. Tämän jälkeen lasketaan tutkan pääkeilan suuntavektorin ja tutkan ja vastaanottimen välisen suuntavektorin välinen kulma. Tämä kulma kertoo kulmaetäisyyden simuloidun tutka-antennin säteilymaksimista ja tätä kulmaa lähinnä olevaa säteilykuvion kulmaa vastaava säteilykuvion amplitudiarvo valitaan amplitudiverhokäyrälle amplitudiksi kyseisellä ajanhetkellä.

Signaaliin voidaan lisätä normaalijakautunutta nollakeskiarvoista satunnaista kohinaa määrittelemällä SNR-arvo, jonka perusteella lasketaan kohinan keskihajonta signaalin keskimääräisen tehon ja signaali-kohinasuhteen perusteella. Jokaiseen näytteeseen lisätään kohinaa satunnainen määrä edellä määritellyn jakauman mukaisesti. SNR-arvo lasketaan kaavalla:

$$\text{SNR} = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_{\text{signaali}}}{P_{\text{kohina}}}\right), \quad (3.3)$$

jossa P tarkoittaa tehoa.

Ylimääräisiä keiloja mallinnetaan lisäämällä amplitudiverhokäyrälle satunnaisiin kohtiin keilauksia. Ensin amplitudiverhokäyrältä valitaan satunnainen keilaus, jonka jälkeen se lisätään satunnaiseen kohtaan amplitudiverhokäyrällä, kertoen se satunnaisella arvolla väliltä 0,09-3 ennen lisäämistä. Ylimääräisten keilojen määrä annetaan simulaattorille prosenttiosuutena oikeiden keilojen määrästä.

Puuttuvien keilojen mallintamista varten simulaattorissa on tieto keilausten maksimien ajankohdista. Keilauksia poistettaessa lasketaan amplitudit herkkyysskynnyksen alapuolelle keilauksen maksimin ympäriltä siihen asti, kunnes ne laskevat määritettyyn herkkyytasoon. Lisäksi herkkyysskynnyksen alapuolelle lasketaan 100 näytettä kummaltakin puolelta keilausta, jotta myös mahdollinen lisätty kohina saadaan keilauksen ympäriltä

poistettua. Tietoa keilausten sijainnista voidaan hyödyntää myös pääkeilan irrotuksen ja jaksontunnistuksen validoinnissa.

Simulaattori palauttaa myös sivukeilataso ja mahdollisen lisätyn kohinan perusteella määritetyn vastaanottimen herkkyytason. Kohinaa lisättäessä signaalin keskimääräinen teho vaikuttaa kohinan amplitudiin. Luotujen amplitudiverhokäyrien keskimääräiseen tehoon vaikuttavat esimerkiksi jaksonaika ja keilan leveys, jolloin keskimääräinen teho vaihtelee amplitudiverhokäyrästä toiseen, eikä näin ollen aina samalle kohdalle asetettu herkkyystaso olisi vertailukelpoinen eri amplitudiverhokäyrien välillä, vaikka simuloitaisiin samaa keilaustyyppiä.

Vastaanottimen herkkyytasoksi ideaalitapauksessa on määritetty korkein sivukeilataso ja kohinaa lisättäessä herkkyytaso nostetaan kohinan keskihajonnan ja 1,7 dB:n verran ylöspäin. Todellisessa vastaanottolanteessa tällaista informaatiota ei ole käytettävissä, mutta tähän ratkaisuun on päädytty, jotta saadaan jokaiseen signaaliin herkkyystaso vertailukelpoiselle kohdalle. Herkkyytason muuttamisen vaikutusta luokittelutulokseen on tutkittu luvussa 4.3.

3.2 Käytetty simulaatiojärjestely

Simulaatioissa käytetty aikavektori on 31 sekunnin mittainen näytteenottotaajuudella 2000 Hz, jolloin kullekin amplitudiverhokäyrälle mahtuu ainakin kolme keilausjaksoa. Parametrirajojen määrittämisen pohjana on käytetty Eravci et al. tutkimuksessa [4] ja Kosolan ja Solanten kirjassa [11, s. 175] käytettyjä parametreja.

Menetelmien tutkimiseksi luotiin kaksi 3000 amplitudiverhokäyrän aineistoa, joissa kummassakin on 1000 amplitudiverhokäyrää kultakin tutkitulta keilaustyyppiltä. Aineistoista toista käytettiin luokittelumenetelmien opettamiseen, ja toista luokittelumenetelmien testaamiseen. Opetusdatana käytetystä aineistosta korvattiin 23 ja testidatana käytetystä aineistosta 31 sektorikeilauksen amplitudiverhokäyrää, joissa keilat olivat sulautuneet yhteen. Näin toimittiin siksi, että tutkitut menetelmät [3, 4, 10, 13] eivät ota tällaisia tapauksia huomioon. Yhteensulautuneita keilauksia on tutkittu erikseen, mikä on kuvattu luvussa 3.5.

Jaksonajan, keilanleveyden ja vaaka- ja korkeussuuntaisten sektorien parametrirajat on listattu taulukkoon 3.1. Vastaanotin sijoitettiin vaakasuunnassa vähintään 2° päähän sektorin keskipisteestä ja vähintään keilanleveyden verran sektorin reunoilta. Korkeussuunnassa vastaanotin oli jokaisen keilaustyyppin tapauksessa kulmassa 0° , ja rasterikeilauksessa korkeussuuntainen sektori määritettiin siten, että 0° oli korkeussuuntaisella sektorilla. Simulaattori varmistaa automaattisesti, että rasterikeilauksessa pääkeiloja näkyy jakson aikana vähintään kaksi, ja että korkeimman ja matalimman näkyvän keilan amplitudissa on vähintään 15% eroa korkeimpaan keilaan nähden. Simulaatioissa on valittu käytettäväksi Taylor-ikkunaa -30 dB:n sivukeilatasolla ja etäisyyden vaikutus on normalisoimalla poistettu.

Taulukko 3.1. Keilaustyyppien simulaatioparametrit

	Kiertokeilaus	Sektorikeilaus	Rasterikeilaus
Jaksonaika (s)	1–10	1–10	1–10
Keilanleveys °	1–4	1–4	1–4
Sektori vaakasuunnassa °	360	-90 – +90 vähintään 15	-90 – +90, vähintään 15
Sektori korkeus-suunnassa °	0	0	-20 – +20, vähintään 10

Kohinaa on tutkittu signaali-kohinasuhteilla 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 35 ja 40 dB. Puuttuvan keilauksen vaikutusta luokittelutuloksiin on tutkittu niin, että kierto-, sektori-, ja rasterikeilaavista keilauksista on poistettu yksi keilaus kolmen ensimmäisen jakson ajalta, ja tämän jälkeen tunnistusta on tutkittu puuttuvan keilauksen tapauksessa 3-7 jakson ajalta signaalin alusta lukien. Ylimääräistä keilausta on tutkittu vastaavasti lisäämällä kunkin keilaustyyppin amplitudiverhokäyriin yksi ylimääräinen keilaus ensimmäisen kolmen jakson ajalle. Tämän jälkeen tunnistus on toteutettu eri 3-9 jakson ajalta signaalin alusta lukien.

3.3 Tutkitut keilaustyyppien tunnistuksen menetelmät

Keilaustyyppien tunnistuksessa on tutkittu neljää eri menetelmää. Nämä menetelmät ovat Eravci et al. [4] ja Kim et al. [10] tutkimusten menetelmät ja kaksi uutta menetelmää, joita kutsutaan nimillä mediaanipäätöspuu ja logistinen regressio. Menetelmiä on tutkittu eri tutkien keilausparametreilla, eri kohinatasoilla, puuttuvilla ja ylimääräisillä keilauksilla ja alkuperäisen signaalin desimoinnilla. Lisäksi on tutkittu Ayazgok et al. tutkimuksen [3] pääkeilan irrotusmenetelmän (luku 2.3.3) toimivuutta.

Amplitudiverhokäyrien tunnistusprosessin ensimmäisessä vaiheessa kaikkien herkkyyskynnyksen alapuolella olevien näytteiden arvoksi määritetään nolla desibeleistä volteiksi (2.1) muunnetulla amplitudiverhokäyrällä. Herkkyyskynnyksen taso saadaan simulaattorista, mutta koska tämä simulaattorista saatu herkkyyskynnys on epärealistisen optimaalinen, on tunnistusta tutkittu Kim et al. menetelmällä myös 0,5; 1,0; 1,5 ja 2,0 dB simulaattorista tulevaa herkkyyskynnystä matalammilla herkkyyskynnyksen tasoilla.

Menetelmien suorituskkyä on arvioitu sekaannusmatriisien ja täsmällisyyden avulla. Lisäksi piirteiden eroavuutta on visualisoitu sirontakaavioiden avulla. Täsmällisyys laskeaan oikein menneiden luokittelutulosten ja kaikkien luokittelutulosten suhteena [16]:

$$\text{Täsmällisyys} = \frac{\text{Oikein menneet luokittelutulokset}}{\text{Kaikki luokittelutulokset}}. \quad (3.4)$$

3.3.1 Eravci et al. menetelmä

Luvussa 2.3.1 esitelty Eravci et al. tutkimuksen [4] menetelmä toteutettiin muuten samoin, mutta jaksontunnistuksessa käytetty autokorrelaatio ja muiden pääkeilojen löytämiseksi käytetty ristikorrelaatio toteutettiin tehokkaammalla tavalla. Eravci et al. tutkimuksessa jakso määritetään kaavan 2.2 avulla ja ristikorrelaatio kaavan 2.6. Tässä tutkimuksessa sen sijaan autokorrelaatio ja ristikorrelaatio määritettiin Wiener-Khinchin teoreemaan perustuvalla menetelmällä nopeiden Fourier'n muunnosten avulla.

Wiener-Khinchin teoreeman mukaan autokorrelaatio saadaan signaalin spektrin tehokkuuden käänteisestä Fourier'n muunnoksesta [17, s. 433]. Spektrin tehokkuus voidaan estimoida periodogramilla [15, s. 212], jonka saa laskettua signaalin Fourier'n muunnoksen ja tämän kompleksikonjugaatin tulona [6, s. 143]. Näin ollen autokorrelaatio voidaan määrittää kertomalla signaalin Fourier'n muunnos ja Fourier'n muunnoksen kompleksikonjugaatti keskenään ja tekemällä tälle käänteinen Fourier'n muunnos.

Diskreettien Fourier'n muunnosten avulla lasketun autokorrelaation suoritus aika on $O(n \log n)$, kun diskreetit Fourier'n muunnokset lasketaan FFT-algoritmeilla [12]. Sen sijaan autokorrelaation laskeminen kaavalla 2.2 on suoritusajaltaan $O(n^2)$, joka tarkoittaa sitä, että näytämäärän kasvaessa sen suoritus hidastuu merkittävästi nopeammin, kuin nopeisiin Fourier'n muunnoksiin perustuvalla menetelmällä.

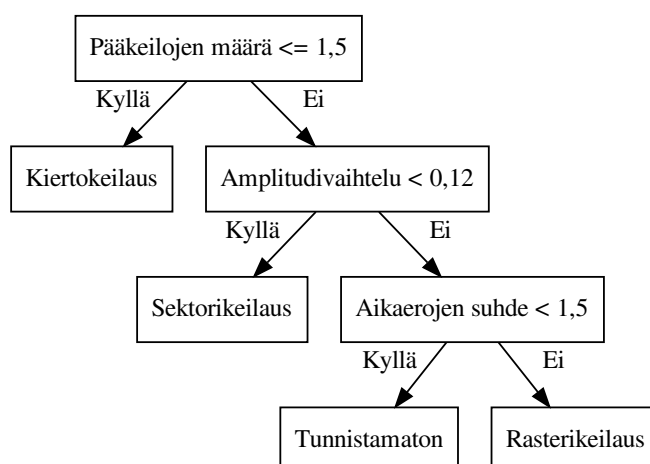
Auto- ja ristikorrelaatioiden toteutustavan eron takia myös käytetyt kynnyksarvot poikkesivat Eravci et al. tutkimuksessa esitetyistä arvoista. Autokorrelaatioissa ei ole käytetty lainkaan kynnystä. Ristikorrelaatioissa on käytetty normalisoidulla skaalalla kynnnyksen arvoa 0.05.

Lisäksi toistettiin Eravci et al. tutkimuksessa tehty koe, jossa määritetään uudelleennäytteistyksen paras jaksonaikaisten näytteiden määrä. Kokeen tuloksen perusteella yhden jakson ajalle on valittu samat 1000 näytettä jakson ajalle, kuin Eravci et al. tutkimuksessa.

Luokittelussa on käytetty Eravci et al. tutkimuksessa esiteltyä päätöspuuta (kuva 2.9) muokattuna (kuva 3.2). Päätöspuusta on poistettu huipukkuusluokittelukriteeri, sillä kartiokeilausta ei ole mallinnettu simulaatioissa. Samasta syystä ruuvikeilaus on korvattu tunnistamattomalla.

3.3.2 Kim et al. menetelmä ja Ayazgok et al. tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmä

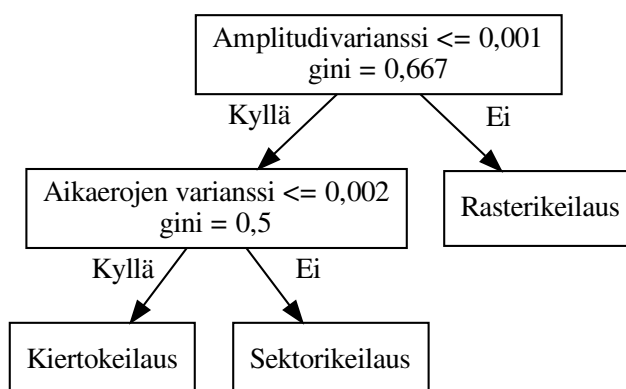
Kim et al. menetelmä on toteutettu pääosin luvussa 2.3.2 kuvatulla tavalla. Koska tutkimuksessa ei kerrota, miten jaksontunnistus olisi tehty, sitä ei ole toteutettu tämän työn toteutuksessa lainkaan. Myös esikäsittelyssä ja piirreirrotuksessa on tehty omat ratkaisut, sillä tutkimuksessa kerrottiin niistä liian vähän.



Kuva 3.2. Muokattu Eravci et al. päätöspuu

Kim et al. menetelmää toteutettaessa desibeleistä volteiksi muuntamisen jälkeen signaali alipäästösuodatetaan liukuvalla keskiarvolla, jonka ikkunan koko on 35 näytettä. Tämän jälkeen signaalista määritetään keilaukset samalla tavalla kuin Eravci et al. tutkimuksen menetelmän toteutuksessa (luku 2.3.1). Lisäksi Kim et al. menetelmää on tutkittu täydentämällä sitä Ayazgok et al. tutkimuksen [3] autokorrelaatioon perustuvalla pääkeilanirrotusmenetelmällä samassa yhteydessä kun vastaanottimen herkkyystasoa on laskettu.

Ayazgok et al. tutkimuksen pääkeilan irrotusmenetelmä on toteutettu luvussa 2.3.3 kuvatulla tavalla yhdellä poikkeuksella. Etsittävän pääkeilan leveydeksi on määritetty aina derivaatan ensimmäinen nollan ylityksen viiveen arvo positiivisten viiveiden puolelta (T_2). Lisäksi derivaatan nollan ylityksiä on haettu vasta viiveestä 30 lähtien.



Kuva 3.3. Muokattu Kim et al. päätöspuu

Tutkimuksessa Kim et al. ei ole annettu käytetyn päätöspuun (kuva 2.10) päätösehdolle $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ arvoja, on tutkimuksen piirteillä opetettu Scikit-learn-kirjastolla [19] päätöspuu (kuva 3.3). Tätä päätöspuuta on käytetty luokiteltaessa näytteitä Kim et al. menetelmällä.

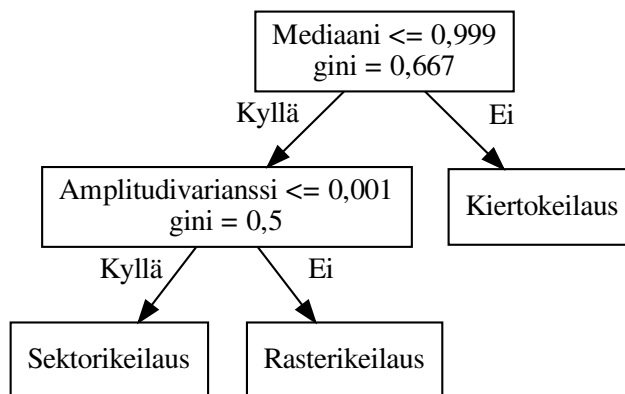
3.3.3 Mediaanipäätöspuu

Merkittävimmät erot eri luokittelumenetelmien välille saatiin poistamalla amplitudiverhokäyrltä keilaus tai lisäämällä amplitudiverhokäyrlle ylimääräinen keilaus. Tutkimuksissa esitellyistä menetelmistä todetaan, etteivät ne ole virhesietoisia puuttuvalle tai ylimääräiselle keilaukselle. Näin ollen virhesietoisuuden parantamiseksi erityisesti puuttuvan keilauksen suhteen uutena piirteenä on tutkittu keilausten perättäisten aikaerojen suhteiden mediaania:

$$T_{med} = \text{med} \left(\frac{\min(\tau(0), \tau(1))}{\max(\tau(0), \tau(1))}, \frac{\min(\tau(k+1), \tau(k+2))}{\max(\tau(k+1), \tau(k+2))}, \dots, \frac{\min(\tau(N_k-2), \tau(N_k-1))}{\max(\tau(N_k-2), \tau(N_k-1))} \right), \quad (3.5)$$

jossa $\tau(n)$ lasketaan kaavalla 2.8 ja N on viimeinen signaalissa oleva havaittujen pääkeilojen välinen aikaero.

Muutoin mediaanipäätöspuumenetelmä on toteutettu samalla tavalla kuin Kim et al. tutkimuksen [10] menetelmä. Luokittelussa on käytetty kuvassa 3.4 näkyvää päätöspuuta.



Kuva 3.4. Mediaanipäätöspuu

Scikit-learn-kirjastolla luotujen päätöspuiden opettamisessa on käytetty muokattua CART-

algoritmia [20]. Päättöspuun ehtojen valinnassa on käytetty kriteerinä gini-indeksiä:

$$g_r(T) = \sum_{k=1}^K p_{rk}(1 - p_{rk}), \quad (3.6)$$

jossa T on solmujen määrä, p_{rk} tietylle luokalle k luokiteltujen datapisteiden osuus tietyllä parametriarvoalueella, ja K on luokkien kokonaismäärä. [5, s. 666]

Gini-indeksin arvo laskee, kun p_{rk} lähestyy nollaa tai yhtä. Suurimman arvonsa se saa, kun $p_{rk} = 0,5$. Gini-indeksiä pyritäänkin minimoimaan päätöspuuta opetettaessa, sillä mitä pienempi gini-indeksi on, sitä suurempi osuus näytteistä saadaan yhteen luokkaan. Gini-indeksi on väärin luokitusten määrään verrattuna parempi kriteeri esimerkiksi siksi, että derivoituvana sitä on mahdollista optimoida gradienttiin perustuvilla menetelmillä. [5, s. 666]

3.3.4 Logistinen regressio

Logistinen regressio ei nimestään huolimatta ole regressiomenetelmä, vaan lineaarinen luokitin. Tässä tutkimuksessa sitä on käytetty selvittämään, onko keilaustyyppin tunnistus lineaarisesti ratkeava ongelma, vai ei. Lineaarisesti ratkeavaksi kutsutaan luokitteluongelmaa, jossa luokat erottuvat täydellisesti toisistaan lineaarisilla päätösrajoilla [5, s. 179]. Lineaarisista luokittimista tutkittavaksi on valittu logistinen regressio, sillä muista havainnoista poikkeavat yksittäiset havainnot eivät haittaa sitä niin kuin esimerkiksi lineaarista diskriminanttianalyysiä [5, s. 186].

Logistisen regression mallia luodessa on esikäsittely ja piirreirrotus toteutettu samoin kuin Kim et al. menetelmän toteutuksessa (luku 3.3.2). Piirteinä on käytetty amplitudivarianssia, aikaerojen varianssia ja keilausten peräkkäisten aikaerojen suhteiden mediaania.

Logistisen regression parametreista on tutkittu eri C :n arvoja L1 ja L2-regularisaatioilla. C on regularisaation voimakkuustermiä käänteisluku [22], eli mitä pienempi C :n arvo, sitä voimakkaammin logistisen regression mallia regularisoidaan. Logistista regressiota opetettaessa on testattu C :n arvoja 0,000001; 0,00001; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1 ja 1. Näistä käyttöön on valittu L1-regularisaatio C :n arvolla 0,1. L1-regularisaatio toimii myös piirteiden valinnassa, sillä joidenkin piirteiden painoarvoksi voi tulla nolla ja näin voidaan päätellä, että kyseiset piirteet ovat luokittelun kannalta turhia [21].

3.4 Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointi

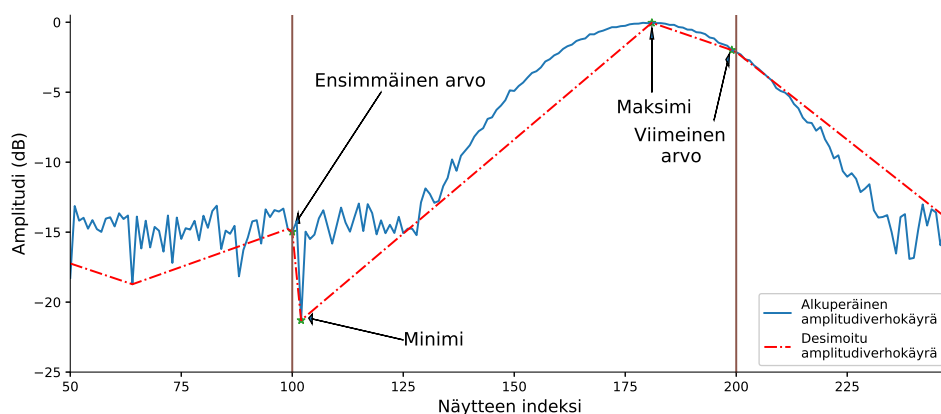
Tässä työssä tutkittiin alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimoinnin vaikutusta luokittelutuloksiin. Aiemmissa tutkimuksissa samaa ei ole tehty. Eravci et al. [4] tutkimuksessa desimoinniksi kutsuttu signaalin uudelleennäytteistysoperaatio tehdään vasta jakson

tunnistuksen ja normalisoinnin jälkeen.

Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimoinnissa signaalia desimoidaan ennen kuin sitä on käsitelty muuten mitenkään. Desimoinnissa on käytetty 3000 amplitudiverhokäyrän testiaineistoa. Signaali-kohinasuhteeksi on valittu 20 dB, ja desimoinnissa on testattu 10, 25, 50, 75, 100, 150 ja 200 näytteen mittaisia ikkunoita. Kuvassa 3.5 on esimerkki desimoinnista 100 näytteen kokoisella ikkunalla.

Kunkin ikkunan alueelta on etsitty maksimin arvo ja ajankohta, sillä keilauksen maksimin perusteella määritetään keilauksen sijainti. Ikkunan alueelta on myös valittu minimiarvo, sillä Eravci et al. tutkimuksen [4] kynnystykseen perustuvassa pääkeilaniirrotusmenetelmässä amplitudin pitää laskea valitun kynnyksen (0,01) alapuolelle, jotta pääkeilasekvenssi voidaan irrottaa muusta signaalista. Lisäksi on valittu ikkunan ensimmäinen ja viimeinen arvo.

Valitun ikkunan alueelta valitaan maksimissaan neljä arvoa ja minimissään kaksi. Minimäärä arvoja valitaan, jos minimi ja maksimi ovat myös ikkunan ensimmäinen ja viimeinen arvo. Tämän jälkeen amplitudiverhokäyrään interpoloidaan lineaarisella interpolaatiolla näiden pisteiden väliset näytteet ja tämän jälkeen ne siirretään tunnistusprosessointiin.



Kuva 3.5. Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointi. Kuvassa 100 näytteen mittaiselta ikkunalta valitaan ensimmäinen, viimeinen, minimi ja maksimi arvo, joiden perusteella loput arvot interpoloidaan desimoituun amplitudiverhokäyrään.

Tunnistusprosessia on myös muokattu niin, että muiden pääkeilojen etsinnässä käytetyn ristikorrelaation maksimikohtien määrittämien keilausten sijaintien ympäriltä haettiin amplitudiverhokäyrältä arvo, jonka jälkeen amplitudi ei enää kasva. Näin siksi, että ikkunointi muutti keilausten muotoja, eikä ristikorrelaation maksimi enää vastannut täysin keilauksen maksimia amplitudiverhokäyrällä.

3.5 Yhteensulautuneet keilaukset

Julkaistuissa tutkimuksissa [3, 4, 10, 13] ei ole erikseen tutkittu yhteensulautuneita keilauksia. Amplitudiverhokäyrällä keilaukset voivat kuitenkin sulautua yhteen. Näin käy esimerkiksi sektori- ja rasterikeilauksissa, jos ESM-vastaanotin on tutkan keilaussektorin reunalla.

Yhteensulautuneita keilauksia varten on simuloitu 100 sektorikeilaavan tutkan amplitudiverhokäyrää vaihdellen keilausparametreja luvun 3.2 mukaisesti. Vastaanotin on sijoitettu vähintään viidesosakeilanleveyden päähän sektorin reunalta ja enintään keilanleveyden päähän. Näin on saatu sektorikeilaavan tutkan keilaukset sulautumaan yhteen kaikissa sadassa amplitudiverhokäyrässä simulaattorin antamalla herkkyystasolla.

Kohinaa on lisätty amplitudiverhokäyriin 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 35 ja 40 dB ja lisäksi on tutkittu ideaalisia amplitudiverhokäyriä. Tunnistusmenetelmänä on käytetty Kim et al. tutkimuksessa esitettyä menetelmää ja siinä pääkeilanirrotusmenetelminä verrattu Ayazgok et al. [3] tutkimuksessa esiteltyä pääkeilanirrotusmenetelmää Eravci et al. tutkimuksen pääkeilan irrotusmenetelmään.

4 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Kierto-, sektori- ja rasterikeilaustyyppien tunnistusmenetelminä on tutkittu Eravci et al. ja Kim et al. tutkimuksissa esitettyjä esikäsitteily-, piirreirrotus- ja luokittelumenetelmiä, sekä luokitteluun uutta keilausten peräkkäisten aikaerojen suhteiden mediaaniin perustuvaa päätöspuuta ja logistista regressiota. Keilausten peräkkäisten aikaerojen suhteiden mediaaniin perustuvaa päätöspuuta kutsutaan jäljempänä mediaanipäätöspuuksi. Luokittelussa on verrattu neljän luokittelumenetelmän toimivuutta eri testitapauksissa ja lisäksi on tutkittu Ayazgok et al. tutkimuksessa esitettyä uutta pääkeilanirrotusmenetelmää.

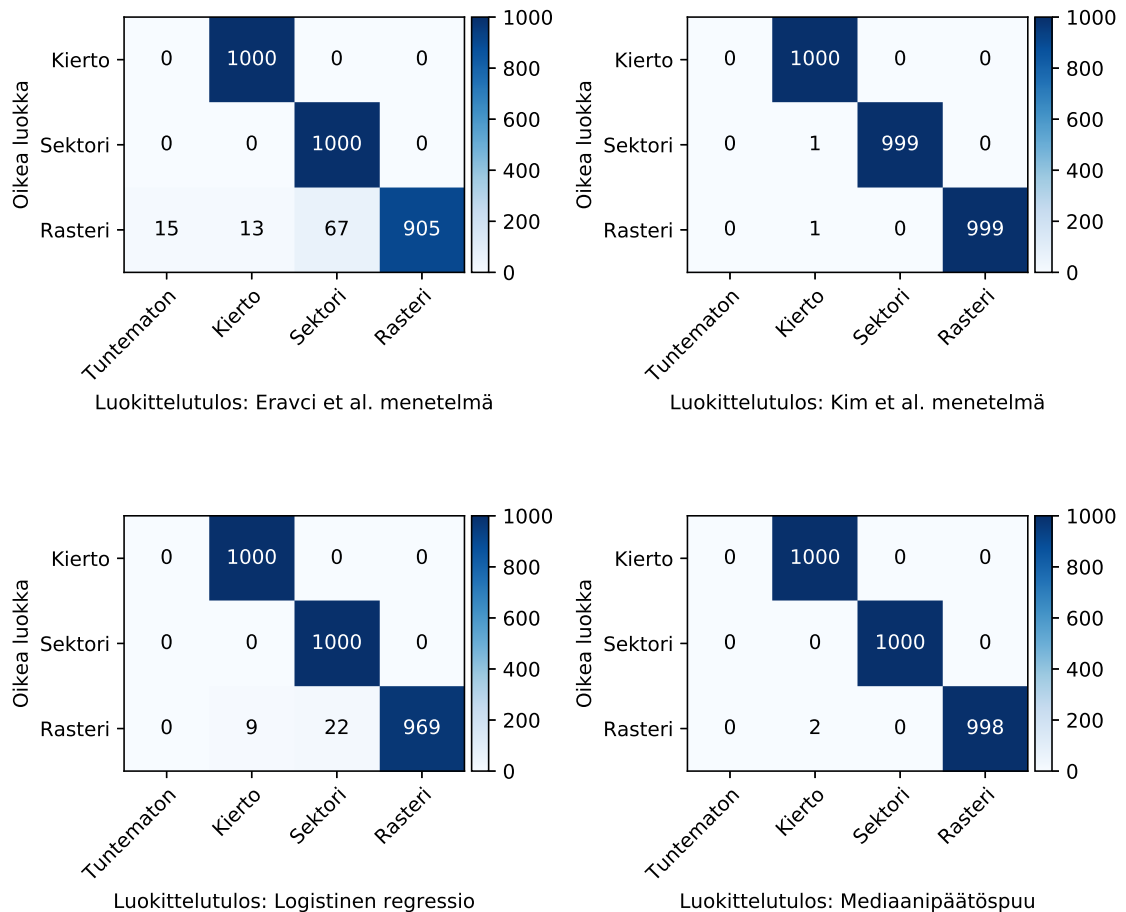
Ensiksi esitellään menetelmien toimivuus ideaalisessa tapauksessa vaihtelemalla keilaustyyppien parametreja. Tämän jälkeen esitellään, miten eri kohinamäärien lisääminen ideaalisiin amplitudiverhokäyriin vaikuttaa luokittelutulokseen. Sitten esitellään vastaanotimen herkkyytason ja muiden pääkeilojen löytämiseen käytetyn ristikorrelaation kynnyksen vaihtelun vaikutusta luokitteluun, yhteensulautuneiden keilausten erottelua Ayazgok et al. tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmällä, Eravci et al. menetelmän uudelleennäyteistykseen näytemääriä, puuttuvia ja ylimääräisiä keilauksia ja alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimoinnin vaikutusta luokitteluun.

4.1 Ideaaliset keilaukset

Luvussa 3.2 määritetyillä parametreilla simuloitiin 1000 kutakin keilaustyyppiä sisältävää amplitudiverhokäyrää eli yhteensä 3000 amplitudiverhokäyrää testiaineistoksi. Näillä amplitudiverhokäyrillä tunnistuksen täsmällisyydeksi saatiin Eravcin menetelmällä 96,8%, Kim et al. menetelmällä 99,9%, logistisella regressiolla 98,9% ja mediaanipäätöspuulla 99,9%. Sekaannusmatriisit ovat kuvissa (4.1).

Eravci et al. menetelmässä rasterikeilauksen virheelliset tunnistukset johtuvat jakson tunnistuksen epäonnistumisesta kahta tunnistamattomaksi luokiteltua näytettä lukuun ottamatta. Jos jaksoksi tunnistuu hyvin lyhyt aika, ei tällä aikavälillä välttämättä ole ainuttaakaan keilaa. Jos jaksonajaksi tunnistuu kaksinkertainen aika, uudelleennäyteistys hävittää kapeimmat keilaukset amplitudiverhokäyrältä. Jos jakson aika on jotain muuta, määritellyllä jaksonajalla on joko vain osa todellisen jakson aikaisista keiloista tai useampi keilaus.

Tunnistamattomiksi tunnistuneista rasterikeilauksista kahdessa tapauksessa jakson tunnistus on mennyt oikein, mutta näissä tapauksissa aikaerojen suhde on ollut alle pää-



Kuva 4.1. Sekaannusmatriisit ideaalitapauksissa, kun kutakin keilaustyyppiä on simuloitu 1000 amplitudiverhokäyrää

töspuun päätösehdon 1,5 (1,27 ja 1,45). Kim et al. menetelmän ja mediaanipäätöspuulla virheellisesti luokituneet näytteet johtuvat alipäästösuodatuksesta, joka on sulauttanut keiloja yhteen.

Taulukkoon 4.1 on listattu jakson tunnistuksen tulokset ideaalitapauksessa. Jaksonaika tulkitaan tunnistuneeksi oikein, jos se on korkeintaan +5% simuloidusta jaksonajasta. Näitä tapauksia on noin puolet rasteriamplitudiverhokäyristä. Enintään +-25% päässä simuloidusta jaksonajasta tai kaksinkertainen todelliseen nähden on noin 88% amplitudiverhokäyristä. Lopuissa noin 13% tapauksia jaksonajaksi tunnistuu jokin muu aika.

Taulukko 4.1. Jaksonajan tunnistumisen onnistuminen ideaalitapauksessa

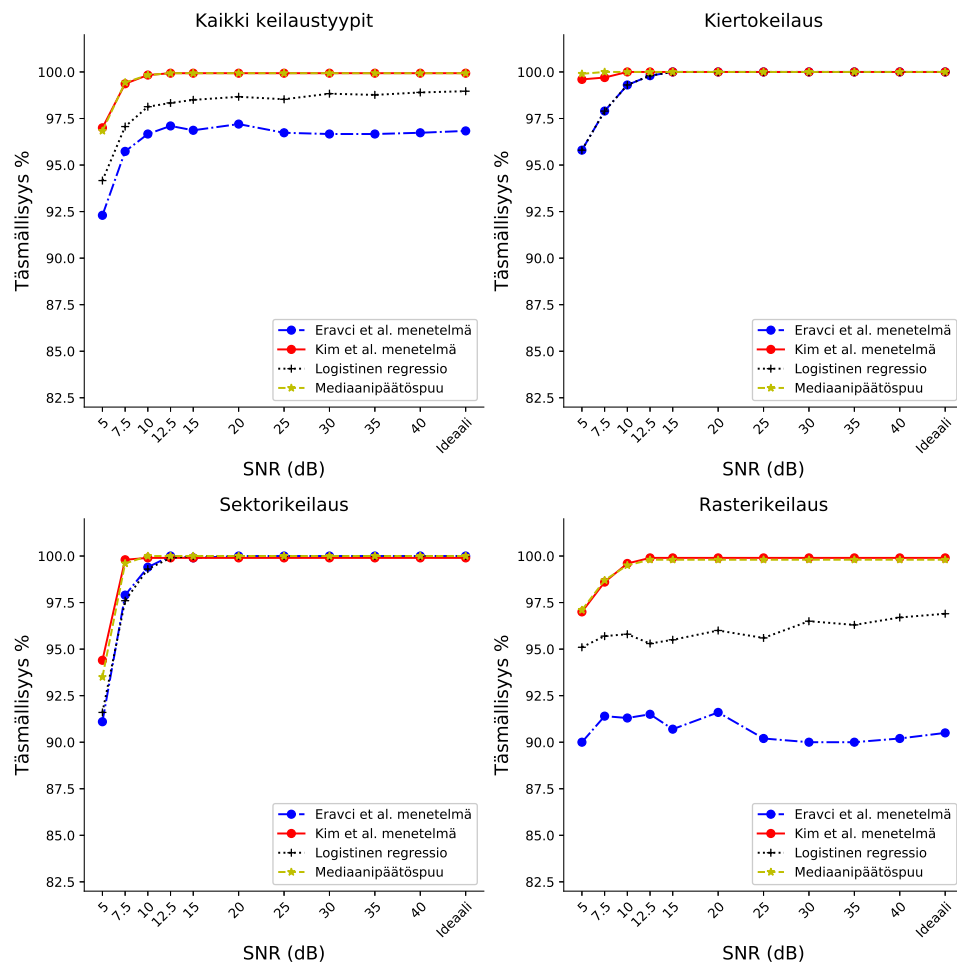
Keilaustyyppi	Oikein tunnistunut jakso	+25% päässä oikeasta jaksosta	Kaksinkertainen jakso	Muut
Kiertokeilaus	1000	0	0	0
Sektorikeilaus	1000	0	0	0
Rasterikeilaus	529	263	83	125

Logistinen regressiomalli luotiin kolmella piirteellä: amplitudivarianssi, aikaerojen varians-

si ja keilausten peräkkäisten aikaerojen suhteiden mediaani. Opetetun luokittimen paino-
kertoimia tutkimalla havaittiin, ettei näistä yhdenkään piirteen painoarvoksi tullut nolla eli
luokitin hyödynsi kaikkia kolmea piirrettä.

4.2 Kohina

Kuvassa 4.2 on tulokset luokittelun täsmällisyydestä eri kohinatasoilla. Edellisessä luvus-
sa mainittuihin ideaaliin amplitudiverhokäyriin on lisätty kohinaa signaali-kohintasusteilla
40; 35; 30; 35; 20; 15; 12,5; 10; 7,5 ja 5 dB. Luokittelumenetelmistä on tutkittu Eravci et
al. ja Kim et al. menetelmien päätöspuuta, sekä mediaanipäätöspuuta ja logistista regres-
siota.



Kuva 4.2. Kohinan vaikutus luokittelutarkkuuteen eri keilaustyypeillä ja luokittelumenetel-
millä.

Kohinan lisääminen heikentää luokittelutarkkuutta, koska mitä enemmän kohinaa, sitä

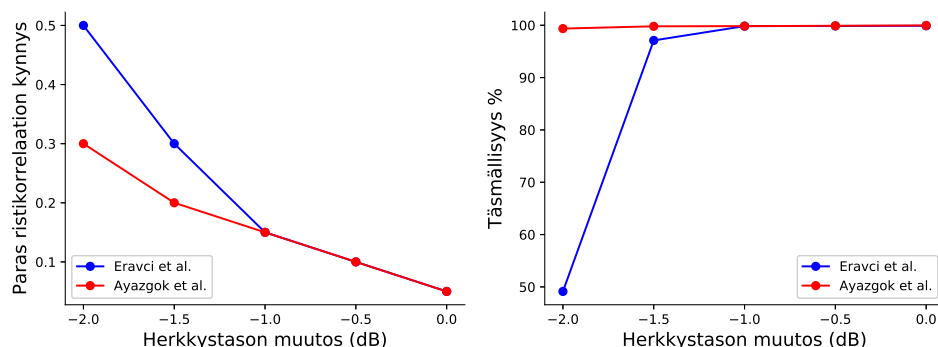
korkeammalle pitää herkkyyskynnys nostaa eli sitä enemmän heikkoja keilauksia jää herkkyyskynnyksen alle. Tämän lisäksi myös piirteiden arvoihin tulee hajontaa, sillä esimerkiksi keilauksen maksimiarvo ja maksimin ajankohta määräytyy keilauksen kohina-maksimin perusteella. Sivukeilatasoksi on valittu -30 dB, jonka takia tunnistustulokset alkavat heiketä vasta hyvin heikoilla signaali-kohinasuhteilla herkkyyskynnyksen noustua tarpeeksi ylös.

4.3 Herkkyystason ja ristikorrelaation kynnyksen vaihtelun vaikutus luokitteluun

Kuvassa 4.3 on tulokset herkkyystason vaihtelun vaikutuksista luokittelutuloksiin Kim et al. menetelmällä. Testitapauksessa on verrattu Eravci et al. tutkimuksen kynnystykseen perustuvaa pääkeilan irrotusmenetelmää ja Ayazgok et al. tutkimuksen kynnystyksen jälkeisen pääkeilasekvenssin autokorrelaation derivaattaan perustuvaa pääkeilan irrotusmenetelmää. Amplitudiverhokäyrissä on käytetty signaali-kohinasuhdetta 20 dB.

Herkkyystason nollataso on tutkan keilaustyyppisimulaattorista saatava sivukeilataso ja kohinan maksimiampitudin perustella määriteltä taso. Tätä herkkyystasoa on laskettu 0,5; 1,0; 1,5; ja 2,0 dB ja kullakin näillä tasolla on tutkittu mikä ristikorrelaation kynnystaso 0,05-0,55 väliltä 0,05:n välein tuottaa täsmällisimmän luokittelutuloksen. Kuvassa 4.3 vasemmalla on kuvattu paras ristikorrelaation kynnys eri herkkyystason muutoksilla ja oikealla luokittelun täsmällisyys eri herkkyystasoilla tällä valitulla parhaalla ristikorrelaation kynnystasolla.

Herkkyystason muutos vaikuttaa myös muiden pääkeilojen löytämisessä käytetyn ristikorrelaation kynnyksen valintaan, sillä mitä enemmän pohjakohinaa signaalissa on, sitä korkeammalle pohjakohinan taso nousee myös ristikorrelaation tuloksessa. Näin ollen ristikorrelaation kynnystasoa on nostettava, jotta kohinapiikit eivät tunnistuisi keilauksiksi.

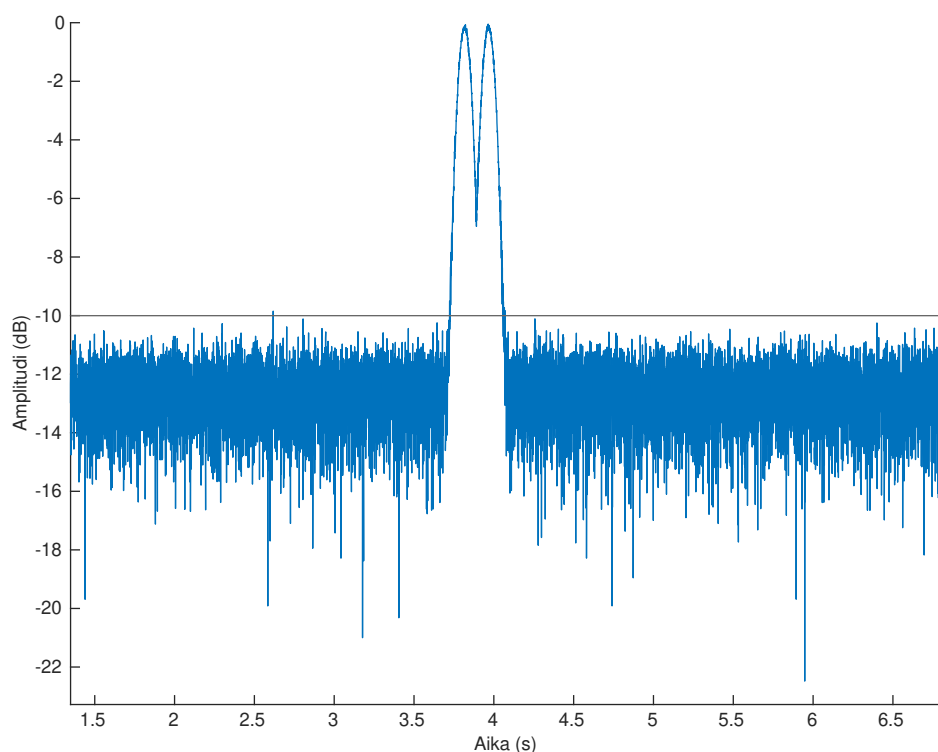


Kuva 4.3. Vasemmalla: Paras muiden pääkeilojen etsinnän ristikorrelaation kynnys eri herkkyystasoilla. Oikealla: Herkkyystason muutoksen vaikutus luokittelutarkuuteen, kun kullakin herkkyystasolla on ristikorrelaation kynnysksi valittu vasemmassa kuvaajassa näkyvä arvo.

Kuvasta 4.3 voidaan havaita, että Ayazgok et al. tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmällä saa irrotettua kohinan keskeltä todellisen pääkeilasekvenssin. Erityisesti tämä näkyy, kun herkkyyskynnystä lasketaan 2,0 dB. Tarkempi pääkeilan irrotus tarkoittaa myös vähäisempää kohinamäärää irrotetussa pääkeilasekvenssissä, jolloin ristikorrelaation kynnyskin voidaan pitää matalammalla tasolla.

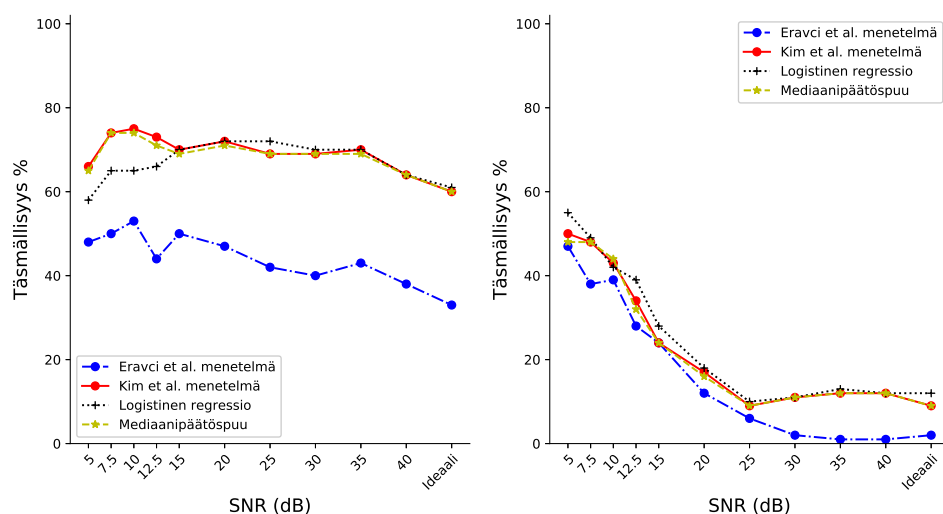
4.4 Yhteensulautuneet keilaukset

Yhteensulautuneita keilauksia tutkittaessa on luotu 100 sektorikeilausamplitudiverhokäyrää, joissa kussakin ovat keilaukset sulautuneet yhteen kuvan 4.4 tapaan. Tulokset näiden amplitudiverhokäyrien tunnistuksesta on kuvassa 4.5. Luokitteluun on käytetty Kim et al. tutkimuksen menetelmää ja vasemmalla on pääkeilan irrotukseen käytetty Ayazgok et al. menetelmää ja oikealla Eravci et al. menetelmää.



Kuva 4.4. Yhteensulautuneet keilaukset esimerkki

Eravci et al. tutkimuksen [4] kynnystykseen perustuvalla pääkeilanirrotusmenetelmällä kohinan lisääntyminen parantaa luokittelutarkkuutta, sillä kohinan lisääntyessä herkkyystaso nousee ja näin keilat erottuvat paremmin. Ayazgok et al. tutkimuksen [3] pääkeilanirrotusmenetelmä toimii keilausten erottamiseksi, kun keilausten välillä amplitudi laskee huipulta vähintään 3,2 dB. Jos amplitudi laskee vähemmän, ei Ayazgok et al. menetelmällä saa erotettua keilauksia toisistaan.



Kuva 4.5. Sektorikeilauksessa yhteensulautuneiden keilausten vaikutus luokittelutarkkuuteen. Vasemmalla: Ayazgok et al. pääkeilanirrotusmenetelmä. Oikealla: Eravci et al. tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmä

Ayazgok et al. tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmä toimii myös heikommin Eravci et al. tutkimuksen menetelmässä kuin muissa menetelmissä. Huonompi toimivuus johtuu uudelleennäytteistysyhteydessä vähentyneestä näytemäärästä.

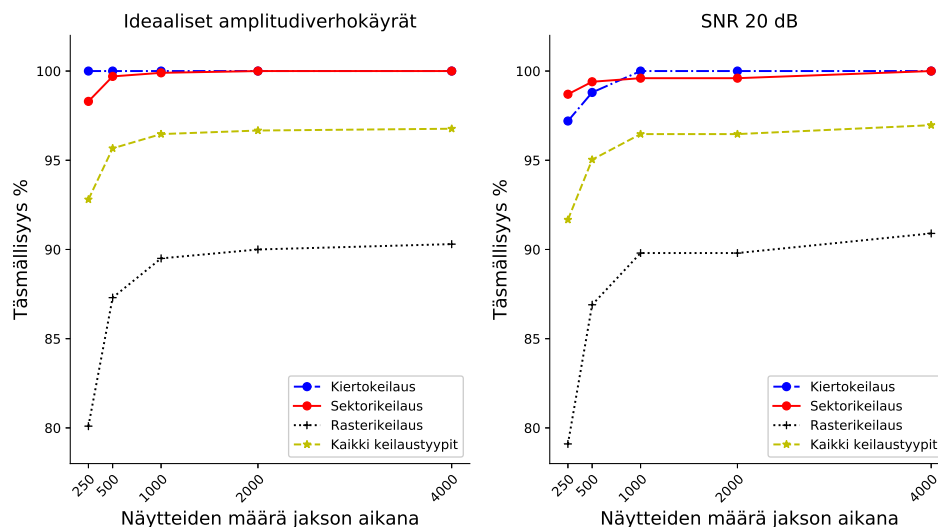
4.5 Näytteiden määrä jakson aikana

Eravci et al. tutkimuksen esikäsittelyssä uudelleennäytteistetään signaali niin, että yhden jakson aikana on aina saman verran näytteitä. Tämä uudelleennäytteistys on kuvattu tarkemmin luvussa 2.3.1. Näytteiden määrä jakson aikana on yksi luokittelutarkkuuteen vaikuttavista parametreista ja sen vaikutusta luokittelutarkkuuteen on tutkittu 250, 500, 1000, 2000 ja 4000 näytteellä. Yhden jakson ajalle on alunperin simuloitu jaksonajasta riippuen 2000-20000 näytettä. Tulokset ovat kuvassa 4.6.

Mitä enemmän näytteitä on jakson aikana, sitä enemmän laskentaa piirreirrotuksessa tarvitaan. Näin ollen mahdollisimman pieni määrä näytteitä jakson aikana olisi laskennan kannalta optimaalinen. Kuvan 4.6 perusteella havaitaan, että alle tuhannella näytteellä jakson aikana luokittelun täsmällisyys laskee, eikä luokittelun täsmällisyys parane merkittävästi tuhatta näytettä suuremmilla määrillä, joten tuhat näytettä jaksoa kohti on valituista näytemääristä optimaalisin. Kohinan lisääminen ei merkittävästi vaikuta tulokseen.

4.6 Puuttuvat ja ylimääräiset keilaukset

Puuttuvia keilauksia on mallinnettu poistamalla kuvan 4.7 tapaan yksi keilaus kolmen ensimmäisen jakson ajalta testiaineistona käytetystä amplitudiverhokäyristä. Tämän jälkeen



Kuva 4.6. Jakson ajalle uudelleennäytteistettyjen näytteiden määrän vaikutus luokittelutarkuuteen Eravci et al. menetelmässä

luokittelua tutkittu 3-7 jakson ajalta. Tulokset tästä ovat kuvassa 4.8 oikealla.

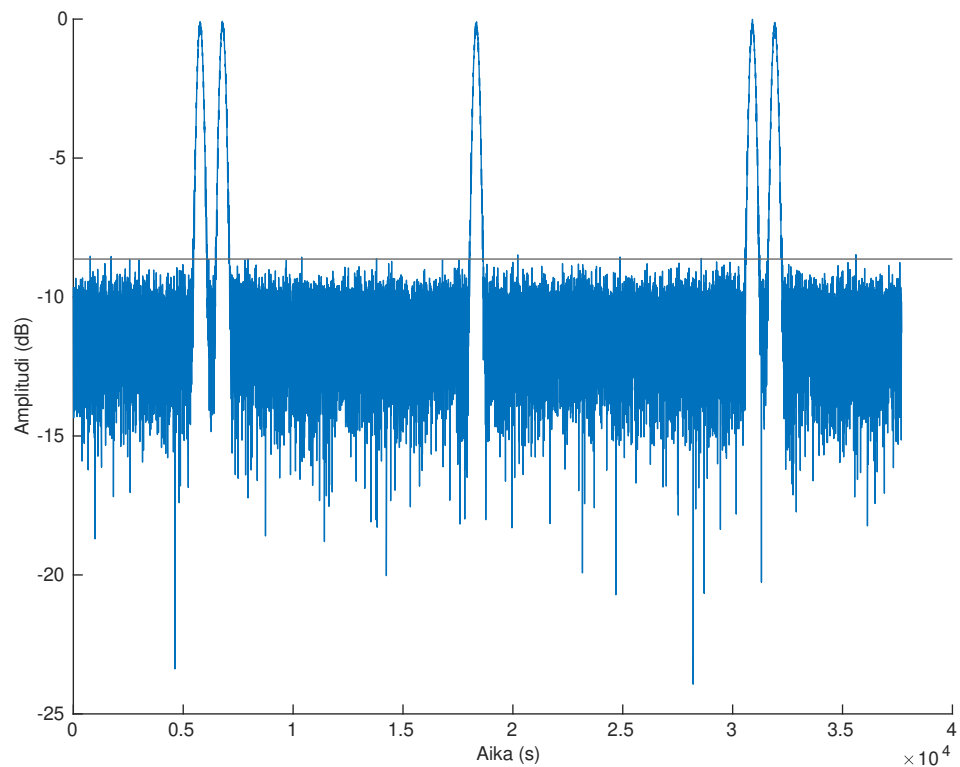
Kuvassa 4.8 vasemmalla on luokittelutulokset eri menetelmillä, kun ensimmäisten kolmen jakson ajalle on lisätty yksi ylimääräinen keilaus. Tämän jälkeen luokittelua on tutkittu 3-9 jakson ajalta.

Eravci et al. tutkimuksen luokittelumenetelmällä luokittelutarkkuus on puuttuvien keilausten tapauksessa 3-7 jaksolla 52,4-59,4%, Kim et al. tutkimuksen menetelmällä 76,7-77,2%, mediaanipäätöspuulla 76,7-99,6% ja logistisella regressiolla 72,7-95,2%. Kirjallisuudessa esitetyt menetelmät eivät siis ole virhesietoisia puuttuville keilauksille, ja tulokset paranevat myös hyvin vähän jaksojen määrää lisätessä.

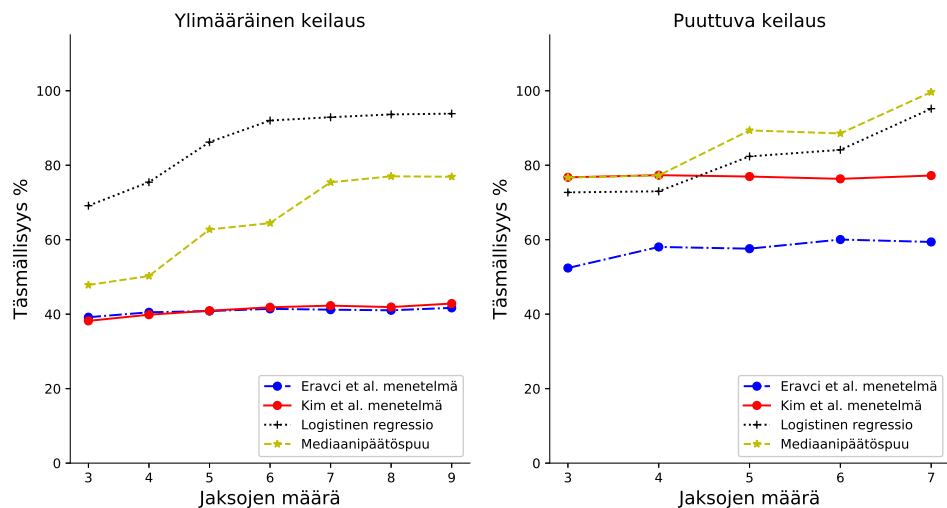
Ylimääräisten keilausten tapauksessa mediaanipäätöspuu ja logistinen regressio toimivat myös selvästi paremmin kuin kirjallisuudessa esitetyt menetelmät. Eravci et al. tutkimuksen menetelmä tuotti 3-9 jakson ajalta 39,2-41,7% luokittelutarkkuuden ja Kim et al. tutkimuksen menetelmä 38,2-42,9%. Mediaanipäätöspuulla luokittelutarkkuudet olivat 47,8-76,9% ja logistisella regressiolla 69,1-93,9%. Logistisella regressiolla luokittelutarkkuus oli kuitenkin jo kuuden jakson kohdalla 92,0%, ja mediaanipäätöspuulla seitsemän jakson kohdalla 75,4%.

Logistisen regression päätösrajapinta sallii päätöspuita enemmän vaihtelua piirteisiin. Päätöspuilla ylimääräiset keilaukset saivat kierto- ja sektorikeilaukset luokittumaan herkästi rasterikeilauksiksi samalla, kun logistisella regressiolla tämä oli selvästi vähäisempää. Logistisella regressiolla taas osa rasterikeilauksista tunnistui sektorikeilauksiksi, mikä oli taas päätöspuilla selvästi vähäisempää.

Kim et al. tutkimuksessa [10] esitellään keilausten aikaerojen erojen varianssiin perustuva piirre ylimääräisten keilausten aiheuttamien virheellisten rasterikeilaustunnistusten vähentämiseksi. Keilausten aikaerojen erojen varianssin ja aikaerojen varianssin arvot



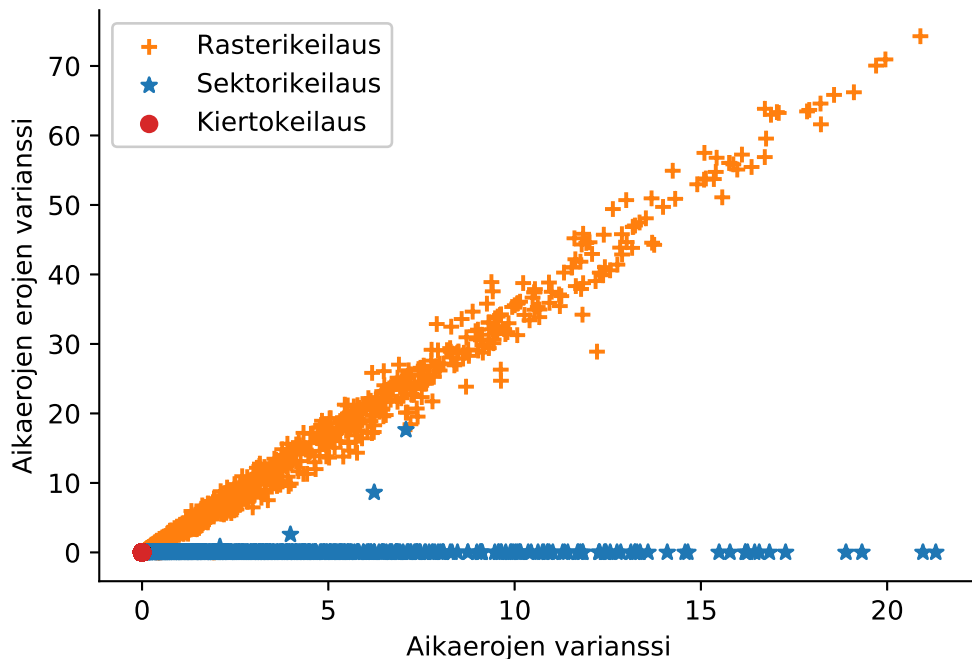
Kuva 4.7. Esimerkki puuttuvasta keilauksesta. Amplitudiverhokäyrältä puuttuu vasemmalta laskien neljäs keilaus.



Kuva 4.8. Vasemmalla: Ensimmäisen kolmen jakson ajalle lisätyn ylimääräisen keilauksen vaikutus luokittelutarkkuuteen eri jaksojen määrillä. Oikealla: Ensimmäisten kolmen jakson ajalta poistetun keilauksen vaikutus luokittelutarkkuuteen eri jaksojen määrillä.

eri amplitudiverhokäyrillä 20 dB:n signaali-kohinasuhteella on merkitty sirontakaavioon 4.9. Sirontakaavion piirteet on laskettu amplitudiverhokäyristä, joista ei ole poistettu tai joihin ei ole lisätty keilauksia.

Kuvasta 4.9 näkyy, että sektorikeilauksessa aikaerojen erot ovat lähes vakioita ja varianssi näin ollen pieni. Tämä johtuu siitä, että sektorikeilauksessa keilaukset tulevat vuorotellen pitkällä ja lyhyellä välillä. Kiertokeilauksessa myös aikaerojen varianssi on pientä, sillä keilaukset tulevat suunnilleen tasaisin väliajoin. Rasterikeilauksessa sen sijaan aikaerojen erojen varianssi vaihtelee merkittävästi jo tapauksissa, joissa ei ole ylimääräisiä satunnaisia keilauksia.



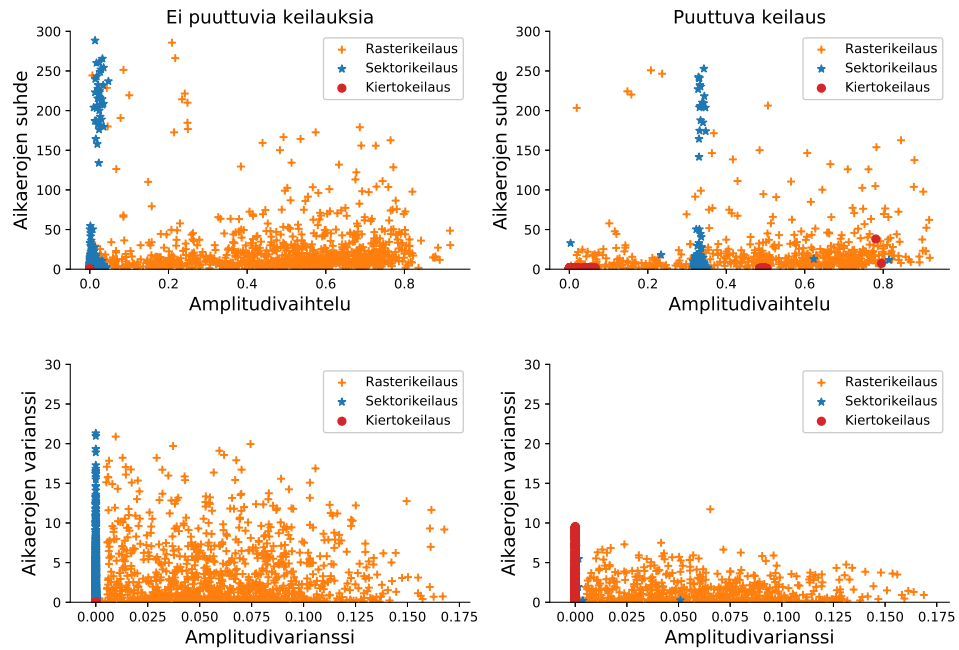
Kuva 4.9. Aikaerojen varianssin ja aikaerojen erojen varianssin sirontakaavio

Rasterikeilauksessa lyhyiden ja pitkien aikaerojen vuorottelu samalla tavalla kuin sektorikeilauksessa pätee vain, jos kultakin vierekkäiseltä rasterin linjalta saadaan keilaus, jolloin ne tulevat kuin sektorikeilauksessa, mutta eri amplitudilla. Simulaatiossa tutkan ja vastaanottimen sijainti rasterin sektorilla on kuitenkin arvottu satunnaisesti ja vain ne tapaukset, joissa vastaanotin on moniselitteisiä amplitudiverhokäyriä tuottavassa sijainnissa, on poistettu.

Simulaatiossa ei siis taata, että vastaanottimeen osuisi kaikilta rasterin linjoilta keilaus, joten rasterin linjat menevät monesti niin, että vastaanottimeen kohdistuukin antennin säteilykuvion nollakohta tai tätä lähellä oleva arvo, eikä tällöin saadakaan vastaanotettua keilausta. Tämän seurauksena keilausten väliset ajat jakson aikana vaihtelevat epäsäännönmukaisesti. Kim et al. tutkimuksessa [10] esitelty keilausten aikaerojen erojen varianssiin perustuva piirre ei siis näin ollen ole hyödyllinen erottamaan ylimääräisten keilausten takia virheellisesti rasterikeilauksiksi tunnistuneita keilauksia oikeista rasterikeilauksista.

Kuvassa 4.10 on vasemmalla sirontakaaviot kahdesta piirreparista tapauksissa, joissa amplitudiverhokäyrällä ei ole puuttuvia keilauksia. Oikealla taas näkyy, kuinka piirteiden arvot hajoavat pitkin piirreavaruutta, jos käytössä on neljä jaksoa ja ensimmäisen kolmen

jakson ajalta on yksi keilaus poistettu.



Kuva 4.10. Vasen sarake: Piirteet ilman puuttuvia keilauksia. Oikea sarake: piirteiden arvot neljän jakson ajalta, kun ensimmäisten kolmen jakson ajalta on poistettu yksi keilaus. Yläriivi: Eravci et al. tutkimuksen piirteet aikaerojen suhde ja amplitudivaihtelu. Alarivi: Kim et al. tutkimuksen piirteet aikaerojen varianssi ja amplitudivarianssi.

Kuvan 4.10 yläriviltä näkyy, että puuttuva keilaus saa Eravci et al. tutkimuksen sekä kierto- että sektorikeilauksen piirteisiin aikaan amplitudivaihtelua. Tämä johtuu jakson tunnistuksen epäonnistumisesta. Koska menetelmässä jakso tunnistetaan ensimmäisenä vaiheena, menee tämän jälkeinenkin tunnistusprosessi väärin, jos jakso on tunnistunut väärin.

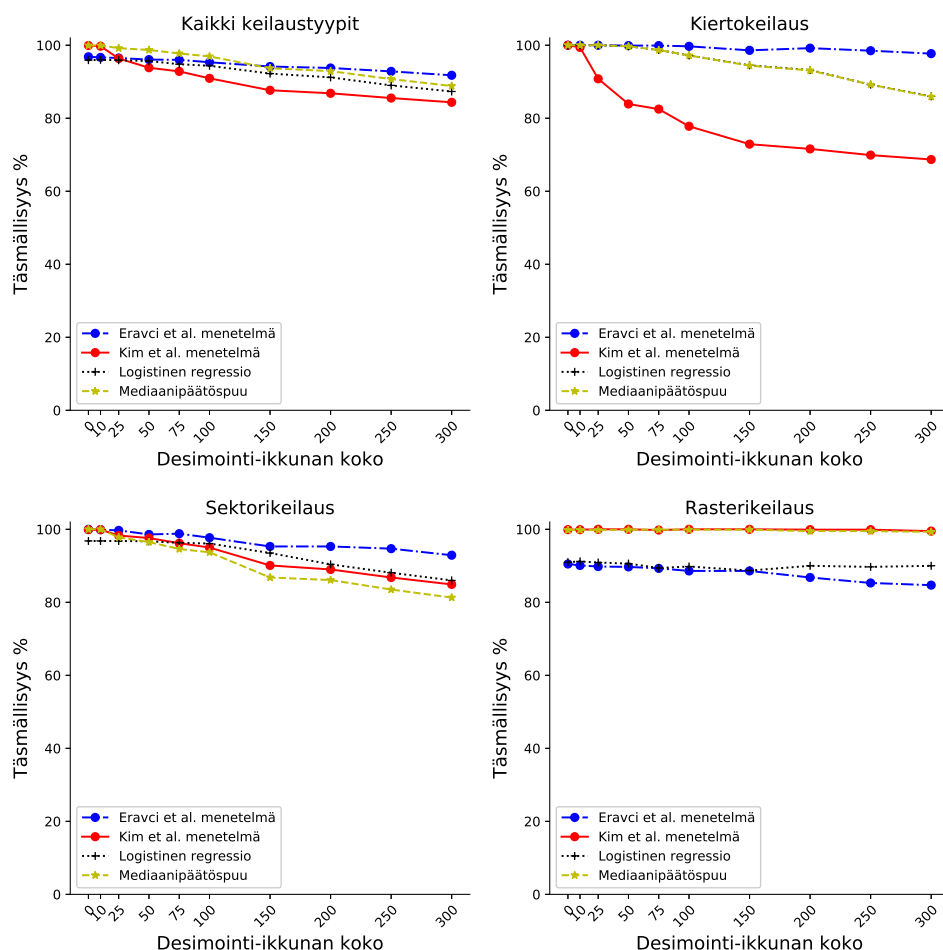
Kuvan 4.10 alariviltä havaitaan, että puuttuva keilaus kasvattaa kierto- ja sektorikeilauksen aikaerojen varianssia. Sektorikeilausamplitudiverhokäyrillä 0,7% näytteistä on keilauksen poisto poistanut myös osan viereisestä keilauksesta, eikä ristikorrelaatiolla näin ole löydetty keilauksen maksimia. Tämän seurauksena on suurempi amplitudivarianssi.

4.7 Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimointi

Eravci et al. [4] tutkimuksessa todetaan, että keilaustyyppin tunnistuksen kannalta tutkasta vastaanotetuista signaaleista kaikki eivät ole tarpeen. Näin ollen on tutkittu, miten hyvin keilaustyyppin tunnistus toimii, jos amplitudiverhokäyrää desimoitaisiin jo vastaanotettaessa, eikä vasta jakson tunnistuksen jälkeen.

Menetelmiä on tutkittu desimoimalla alkuperäisiä amplitudiverhokäyriä 10, 25, 50, 75, 100, 150 ja 200 kokoisilla ikkunoilla. Signaali-kohinasuhteena on käytetty 20 dB:ä ja kun-

kin ikkunan alueelta on valittu minimi, maksimi ja ensimmäinen ja viimeinen arvo, joiden perusteella puuttuvat arvot on interpoloitu lineaarisesti. Kuvassa 4.11 esitettyjen tulosten perusteella alkuperäistä signaalia desimoidessa Eravci et al. tutkimuksen menetelmä toimii parhaiten.



Kuva 4.11. Alkuperäisen amplitudiverhokäyrän desimoinnin vaikutus luokittelutarkkuuteen eri menetelmillä ja eri keilaustyypeillä

300 näytteen mittaisilla ikkunoilla desimoituna Eravci et al. tutkimuksen menetelmällä luokittelutarkkuus on 91,8%, Kim et al. menetelmällä 84,4%, Mediaanipäätöspuulla 88,8% ja logistisella regressiolla 87,3%. Luokittelutulos heikkeni hitaimmin Eravci et al. tutkimuksen menetelmällä, sillä siinä signaali keskiarvoistetaan jaksojen yli, mikä vähentää ikkunoinnista johtuvien erojen vaikutusta keilausten välillä.

Erot saman amplitudiverhokäyrän eri keilausten välillä johtuvat siitä, että ne tulevat eri kohtiin desimointi-ikkunoita. Tämän seurauksena keilausten muoto amplitudiverhokäyrällä vaihtelee. Tämä heikentää muiden pääkeilojen löytämiseen käytetyn ristikorrelaation toimivuutta. Ikkunan koon kasvattaminen heikentää myös väistämättä luokittelutuloksia,

sillä lähekkäin olevat keilaukset voivat osua samaan ikkunaan ja näin vain yksi niistä tunnistuu.

5 YHTEENVETO

Automaattisesta tutkan keilaustyyppin tunnistuksesta on julkaistu neljä tutkimusta, mikä on hyvin vähän. Näin ollen ei ole odotettavissakaan, että tutkimuksissa olisi käsitelty läheskään kaikkia ongelmia. Tutkimusten menetelmät perustuvat simuloituun dataan, sillä näin saadaan enemmän vaihtelua keilausparametreihin ja toisaalta todellisilla ESM-vastaanottimilla vastaanotetun datan saatavuus on heikkoa ja data on turvaluokiteltua.

Tästä huolimatta on simulointeja kuitenkin tehty kovin vähän: Eravci et al. tutkimuksessa kutakin keilaustyyppiä on simuloitu 20 kappaletta, Kim et al. tutkimuksessa 50, Li et al. tutkimuksessa 100 ja Ayazgok et al. tutkimuksessa on luotu kutakin keilaustyyppiä 16 jaksoa. Kussakin 16 jaksossa on käytetty samoja parametreja, ja tämän jälkeen on Monte Carlo -algoritmeilla on luotu kutakin keilaustyyppiä 160 jaksoa.

Toinen ongelma tutkimuksissa on, ettei niissä ole kerrottu kovin tarkasti käytettyjä keilaustyyppien parametreja tai parametreista on kerrottu vain osa. Parhaiten käytetyt parametrit kuvataan Eravci et al. tutkimuksessa [4], mutta siinäkin ei kerrota esimerkiksi simuloidun tutkan keilanleveyttä tai käytettyä sivukeilatasoa. Ayazgok et al. [3] tutkimuksessa on taulukoitu Monte Carlo -simulaatoiden perustana olleet keilausparametrit. Kim et al. [10] ja Li et al. [13] keilausparametreja ei ole kerrottu lainkaan.

Keilaustyyppien simulointi, esikäsittely, piirreirrotus ja tunnistusmenetelmät käsitellään tarkimmin Eravci et al. tutkimuksessa [4], joten tätä on käytetty tässä työssä tunnistusten pohjana. Kim et al. [10] tutkimuksen menetelmän toteutuksessa on sovellettu Eravci et al. [4] tutkimuksen menetelmää niiltä osin, joilta Kim et al. tutkimuksen menetelmät on kuvattu puutteellisesti. Kim et al. [10] tutkimuksen menetelmän piirteitä ja uuden peräkkäisten keilausten välisten aikojen suhteiden mediaanipiirrettä on käytetty logistisen regressioon ja uutta mediaanipiirrettä hyödyntävän päätöspuun piirteinä. Kyseistä päätöspuuta kutsutaan mediaanipäätöspuuksi.

Ideaalisessa tapauksessa luokittelun täsmällisyydeksi saadaan Eravci et al. [4] tutkimuksen menetelmällä 96,8%, Kim et al. menetelmällä 99,9%, Logistisella regressiolla 98,9% ja mediaanipäätöspuulla 99,9%. Eravci et al. [4] tutkimuksen muita huonompi luokittelutarkkuus johtuu autokorrelaatioon perustuvan jakson tunnistuksen epäonnistumisesta rasterikeilauksissa. Jakso tunnistuu oikein vain noin puolessa rasterikeilausamplitudiverhokäyristä. Kim et al. menetelmällä ja mediaanipäätöspuulla yksittäiset virheelliset luokittelutulokset johtuvat alipäästösuodatuksen yhteen sulauttamista keilauksista. Logistisen regressioon päätösrajapinnat jättävät enemmän vaihteluvaraa kierto- ja sektorikeilausten

piirteisiin, jolloin yksittäisiä rasterikeilauksia tunnistuu myös kierto- tai rasterikeilauksiksi.

Ideaalisiin amplitudiverhokäyriin lisättiin kohinaa 5-40 dB:n signaali-kohinasuhteilla kohinan vaikutusten tutkimiseksi. Kohinan suhteen tässä työssä käytetty -30 dB:n sivukeilataso ja siihen sidottu herkkyyskynnys on varsin hyvä, sillä tunnistustulokset alkavat heikettä vasta alle 10 dB:n signaali-kohinasuhteilla. Eravci et al. [4] tutkimuksessa luokittelutulokset heikkenevät selvästi jo paremmilla signaali-kohinasuhteilla. Eri menetelmien ja luokittimien herkkyyydessä kohinalle ei havaittu merkittäviä eroja.

Työssä on käytetty vastaanottimen herkkyyskynnyksenä keilaustyyppisimulaattorista saatavaa korkeimman sivukeilatason, kohinan keskihajonnan ja 1,7 dB:n summaa. Tähän ratkaisuun on päädytty, jotta herkkyyskynnys olisi pohjakohinaan nähden samalla korkeudella eri amplitudiverhokäyrissä ja näin saadut tulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään.

Koska tällä tavoin määritetty herkkyyskynnys on liian optimaalinen, on tutkittu sen laskemista 0,5-2,0 dB. Luokittelussa on käytetty Kim et al. [10] tutkimuksen menetelmää ja pääkeilan irrotusmenetelmänä on vertailtu Eravci et al. [4] tutkimuksen kynnystämiseen perustuvaa pääkeilanirrotusmenetelmää ja Ayazgok et al. [3] tutkimuksen kynnystämällä saadun pääkeilasekvenssin autokorrelaation derivaattaan perustuvaa pääkeilanirrotusmenetelmää. Havaintona on, että erityisesti, kun herkkyyskynnystä laskettiin 2,0 dB Ayazgok et al. [3] tutkimuksen menetelmällä saa erotettua pääkeilan Eravci et al. [3] tutkimuksen menetelmää paremmin.

Simuloitaessa amplitudiverhokäyriä havaittiin, että keilaukset sulautuvat sektori- ja rasterikeilauksissa yhteen, mikäli vastaanotin on sektorin reuna-alueilla. Eravci et al. [4] tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmällä laskettaessa yhteensulautuneet keilaukset tunnistuvat aina yhdeksi keilaukseksi. Ayazgok et al. [3] tutkimuksen pääkeilanirrotusmenetelmässä sen sijaan saadaan keilaukset irrotettua toisistaan, mikäli amplitudi niiden välillä laskee vähintään 3,2 dB.

Amplitudiverhokäyrältä voi puuttua keilauksia, tai siellä voi olla ylimääräisiä keilauksia. Näistä puuttuvat keilaukset ovat todennäköisempiä, sillä keilauksia jää vastaanottamatta, jos esimerkiksi vastaanotin antennia käännetään toiseen suuntaan. Jos amplitudiverhokäyrälle päätyy ylimääräisiä keilauksia, on tällöin aiemmassa signaaliprosessoinnissa mennyt jotain väärin, eikä tällöin amplitudiverhokäyrän oikeellisuudesta muutenkaan ole takeita.

Näitä on tutkittu poistamalla tai lisäämällä satunnaisesti yksi keilaus ensimmäisen kolmen jakson ajalle amplitudiverhokäyrällä ja tutkimalla tämän jälkeen tunnistustuloksia 3-7 jakson ajalta puuttuvilla keilauksilla ja 3-9 jakson ajalta ylimääräisillä keilauksilla. Signaali-kohinasuhteena on käytetty 20 dB:ä.

Erityisesti puuttuville keilauksille virhesietoisemman luokittelumenetelmän kehittämiseksi otettiin käyttöön uusi piirre: keilausten peräkkäisten aikaerojen välisten suhteiden mediaani. Piirrettä hyödynnettiin päätöspuussa, jota kutsutaan mediaanipäätöspuuksi ja logistisessa regressiossa. Piirre todettiin myös toimivaksi sillä edellytyksellä, että ehjiä jaksoja

on riittävästi käytettävissä.

Kun puuttuvien keilausten tapauksessa tunnistuksessa on käytössä seitsemän jaksoa, mediaanipäättöspuulla luokittelutarkkuudeksi saatiin 99,6% ja logistisella regressiolla 95,2%. Eravci et al. [4] tutkimuksen luokittelumenetelmällä luokittelutarkkuus jäi 59,4%:iin ja Kim et al. [10] tutkimuksen menetelmällä 77,2%:iin.

Ylimääräisillä keilauksilla logistinen regressio luokitteli keilaukset parhaiten, kuuden käytettävissä olevan jakson kohdalla luokittelutarkkuus oli 92%, jonka jälkeen se parani enää vähän jaksojen määrää lisätessä. Mediaanipäättöspuu oli toiseksi paras, seitsemän jakson kohdalla luokittelutarkkuus oli 75%, josta luokittelutarkkuus parani enää vähän jaksojen määrää lisättäessä. Eravci et al. [4] tutkimuksen ja Kim et al. [10] tutkimuksen menetelmillä luokittelutarkkuudet jäivät noin 40%:iin. Myös Kim et al. tutkimuksessa esitetty keilausten aikaerojen erojen varianssipiirre todettiin käyttökelvottomaksi ylimääräisten keilausten tunnistamisessa.

Viimeisenä aiheena työssä tutkittiin simuloitujen amplitudiverhokäyrien desimointia ennen tunnistusprosessointia ikkunoimalla niitä 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 ja 300 näytteen kokoisilla ikkunoilla. Kultakin ikkunalta määritettiin minimi, maksimi, ja ikkunan ensimmäinen ja viimeinen arvo, joiden perusteella muut näytteet interpoloitiin lineaarisesti.

Desimoinnissa parhaiten luokittelutarkkuuden säilytti Eravci et al. tutkimuksen menetelmä, sillä keskiarvoistus jaksojen yli vähentää ikkunoinnista johtuvia eroja keilausten välillä. 300 näytteen mittaisilla ikkunoilla desimoituna Eravci et al. [4] tutkimuksen menetelmällä luokittelutarkkuus on 91,8%, Kim et al. [10] menetelmällä 84,4%, Mediaanipäättöspuulla 88,8% ja logistisella regressiolla 87,3%.

Tutkimuksen perusteella ideaalitapauksessa ja kohinaisessa ympäristössä Kim et al. [10] ja mediaanipäättöspuu tuottavat parhaat lopputulokset. Puuttuvien keilausten tapauksessa mediaanipäättöspuu toimii parhaiten, ja ylimääräisten keilausten tapauksessa logistinen regressio. Desimoinnille vähiten herkkä on Eravci et al. [4] tutkimuksen menetelmä.

Jatkotutkimuksena on selvittää, miten saataisiin aikaan luokitin, joka toimii parhaiten sekä ideaalitapauksessa ja kohinaisessa ympäristössä että puuttuvien tai ylimääräisten keilausten ja desimoitujen amplitudiverhokäyrien tapauksessa. Yhtenä vaihtoehtona on korvata logistinen regressio epälineaarisella luokittimella, kuten satunnaismetsällä tai tukivektorikoneella. Lisäksi piirteiden havainnoinnissa voidaan parantaa puuttuvien ja ylimääräisten keilausten havainnointia, jolloin erityisesti ylimääräisten keilausten tapauksessa voitaisiin luokittelutulokseksi antaa tunnistamaton.

Tutkimuksessa on myös oletettu, että sekä lähetin, että vastaanotin pysyvät paikallaan. Tilanne ei kuitenkaan ole aina tällainen, vaan esimerkiksi lentokone- ja laivatutkat liikkuvat. Lisäksi tutkaa voidaan keilauksen lisäksi fyysisesti kääntää, jolla on myös vaikutusta amplitudiverhokäyriin. Simuloidut amplitudiverhokäyrät ovat myös todennäköisesti todellisuudessa vastaanotettuja amplitudiverhokäyriä siistimpiä eli todellisuudessa amplitudiverhokäyriä on enemmän häiriöitä, joten jatkotutkimuksena on testata menetelmää

todellisella ESM-vastaanottimella vastaanotetulla datalla.

Työssä on myös rajattu tutkimus kolmeen mekaanisesti keilaavaan keilaustyyppiin. Tutkimuksissa Ayazgok et al. [3] ja Li et al. [13] oli kuitenkin keskitytty elektronisen keilauksen tunnistukseen, joten näiden tutkimusten menetelmien tutkimus ja kehittäminen on yksi jatkokehityksaihe. Tunnistusalgoritmin kehittäminen reaaliaikaiseksi on myös yksi tulevaisuuden tutkimussuunta.

LÄHDELUETTELO

- [1] D. Adamy. *EW 101 - A First Course in Electronic Warfare*. Artech House, 2001. ISBN: 978-1-58053-169-6.
- [2] D. Adamy. *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*. Boston, MA: Artech House, 2003. ISBN: 1580535828.
- [3] S. Ayazgok, C. Erdem, M. T. Ozturk, A. Orduyilmaz ja M. Serin. Automatic Antenna Scan Type Classification for Next-generation Electronic Warfare Receivers. *IET Radar, Sonar and Navigation* 12.4 (2018), 466–474. DOI: 10.1049/iet-rsn.2017.0354.
- [4] B. Barshan ja B. Eravci. Automatic Radar Antenna Scan Type Recognition in Electronic Warfare. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 48.4 (2012), 2908–2931. DOI: 10.1109/TAES.2012.6324669.
- [5] C. M. Bishop. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006. ISBN: 978-0-38731-073-2.
- [6] P. Bloomfield. *Fourier Analysis of Time Series: an Introduction*. 2000. ISBN: 978-0-47188-948-9.
- [7] B. Eravci. Automatic Radar Antenna Scan Analysis in Electronic Warfare. Tutkielma. Elokuu 2010.
- [8] A. J. Fenn. *Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications*. Boston: Artech House/ Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, 2008. ISBN: 978-1-59693-274-6.
- [9] T. H. Greer. *Automatic Recognition of Radar Scan Type*. US Patent 6,697,007. Toukokuu 2004. URL: <https://pimg-fpiw.uspto.gov/fdd/07/970/066/0.pdf>.
- [10] Y.-H. Kim, K.-H. Song, J.-W. Han ja H.-N. Kim. Radar Scan Pattern Analysis for Reduction of False Identification in Electronic Warfare Support Systems. *IET Radar, Sonar and Navigation* 8.7 (2014), 719–728. DOI: 10.1049/iet-rsn.2013.0089.
- [11] J. Kosola ja T. Solante. *Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Maanpuolustuskorkeakoulu, sotatekniikan Laitos, 2013.
- [12] R. D. Kumar, B. M. Rao ja P. Nitin. Optimizing ACF Using Wiener-Khinchin Theorem. *Journal of Advances in Engineering Science* 3.1 (2010), 71–76.
- [13] C. Li, W. Wang, L. Shi ja X. Wang. Recognition and Parameter Extraction of One-dimensional Electronic Scanning for 3D Radar. *International Journal of Antennas and Propagation* 2014 (2014), 1–9. DOI: 10.1155/2014/567954.
- [14] B. R. Mahafza. *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB®*. ID: 1659651. London: Chapman ja Hall/CRC, 2013. ISBN: 978-1-43988-496-6.

- [15] D. G. Manolakis, V. K. Ingle, S. M. Kogon ja I. Books24x7. *Statistical and Adaptive Signal Processing: Spectral Estimation, Signal Modeling, Adaptive Filtering, and Array Processing*. Boston: Artech House, 2005. ISBN: 978-1-58053-366-9.
- [16] C. E. Metz ja C. E. Metz. Basic Principles of ROC Analysis. *Seminars in Nuclear Medicine* 8.4 (1978), 283–298.
- [17] S. Miller ja D. Childers. *Probability and Random Processes : With Applications to Signal Processing and Communications*. ID: 858694. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2012. ISBN: 978-0-12387-013-1.
- [18] T. M. Mitchell. *Machine Learning*. New York: McGraw-Hill, 1997. ISBN: 978-0-07042-807-2.
- [19] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot ja E. Duchesnay. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* 12 (2011), 2825–2830.
- [20] Scikit-learn.org. 1.10. *Decision Trees*. 2019. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html> (viitattu 25.04.2019).
- [21] Scikit-learn.org. 1.1.11. *Logistic regression*. 2019. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/linear%5C_model.html%5C#logistic-regression (viitattu 25.04.2019).
- [22] Scikit-learn.org. *sklearn.linear_model.LogisticRegression*. 2019. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear%5C_model.LogisticRegression.html (viitattu 25.04.2019).
- [23] N. A. A. Simojoki. Ilmatorjunnan aktioaseistuksesta nykyhetkellä. Vuoden vaihteen katsaus 1960/1961. *Tiede ja ase* 19.19 (tammikuu 1), 182–215. URL: <https://journal.fi/ta/article/view/47421>.
- [24] M. I. Skolnik. *Radar Handbook*. 3rd. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-0-07162-113-7.
- [25] G. W. Stimson. *Introduction to Airborne Radar*. 2. Mendham: Scitech Publishing, 1998. ISBN: 1891121014.
- [26] R. G. Wiley. *ELINT: the Interception and Analysis of Radar Signals*. Boston: Artech House, 2006. ISBN: 978-1-58053-926-5.